

* * *

Электричество, 2016, № 2, с. 44–51.

Процессы деградации электроизоляционных конструкций авионики

ВАСИЛЬЕВ Ф.В., МЕДВЕДЕВ А.М.

Особенностями работы электроизоляционных конструкций авионики являются экстремальные условия эксплуатации, а также миниатюрность элементов изоляции, не позволяющая создавать достаточный запас прочности. Вместе с тем низкий уровень рабочих напряжений в корне изменил механизмы отказов изоляции и соответствующие факторы обеспечения надежности. Если раньше основными формами отказа были только электрический или тепловой пробой, то для современной авионики характерны электрохимические процессы отказов, свойственные в основном аппаратуре тропического исполнения и морского базирования. Пользователи авиационной аппаратуры, построенной на высокоинтегрированной элементной базе, так или иначе сталкивались с новыми явлениями отказа изоляции, механизм и соответствующие меры предотвращения которых были не известны. В статье излагаются принципы расчета электроизоляционных конструкций из композиционных материалов, рассматривается механизм увлажнения и развития процессов деградации изоляции печатных плат – основного конструктивного элемента электроники и, в частности, авионики.

Ключевые слова: авионика, электрическая изоляция, электрохимические процессы отказов, композиционные материалы

Устройства авионики используют в качестве монтажных подложек печатные платы. Диэлектрические основания печатных плат – композиционные диэлектрики, которые содержат, по меньшей мере, два компонента с различными значениями энергии активации E и электроизоляционными характеристиками, например, удельного сопротивления γ . 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 для различных путей утечки тока это уравнение имеет вид

$$\gamma_V = q_1 \gamma_{V1}^c + q_2 \gamma_{V2}^c,$$

где γ_V , γ_{V1} , γ_{V2} – удельные сопротивления смеси и отдельных компонентов; q_1 , q_2 – объемные концентрации компонентов ($q_1 + q_2 = 1$); c – 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, значение $c = -1$. При последовательном включении компонентов, например в чередующихся слоях листа, $c = +1$. Наконец, когда оба компонента распределены хаотически, что имеет место для утечек тока в трансверсальном направлении печатных плат, уравнение Лихтенеккера приобретает вид: $\ln \gamma_V = q_1 \ln \gamma_{V1} + q_2 \ln \gamma_{V2}$. Воспользовавшись этим соотношением и уравнением Аррениуса, получим выражение для температурной

зависимости сопротивления двухкомпонентного диэлектрика:

$$r_V = r_{01}^{q_1} + r_{02}^{q_2} \exp(q_1 E_1 + q_2 E_2) / kT.$$

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

$$r_V = \prod_{i=1}^n r_{0i}^{q_i} \exp\left(\sum_{i=1}^n q_i E_i\right) / kT,$$

где n — число компонентов, составляющих объем диэлектрика.

В технических диэлектриках электропроводность создается за счет диссоциации неизбежно присутствующих в диэлектрике загрязнений, с трудом удаляемых в процессе синтеза полимеров, производства композитов или печатных плат. Даже весьма малые с трудом обнаруживаемые ионогенные примеси способны заметно влиять на проводимость диэлектрика. Увлажнение резко снижает сопротивление изоляции, так как 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.

Для электроизоляционных конструкций электронных изделий неблагоприятны 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 в определенных условиях ее эксплуатации.

Стандартами установлены требования к сопротивлению изоляции независимо от своеобразия электроизоляционных конструкций и без учета того, что критерии качества и надежности изоляции современных электронных средств существенно изменились, в основном по уровню рабочих напряжений.

Изоляция, в первую очередь, не должна шунтировать цепи, содержащие элементы с большим сопротивлением входа–выхода (полевые транзисторы со структурой металл–диэлектрик–полупроводник, интегральные микросхемы (ИМС) на элементах с зарядовой связью и т.п.). Конструирование таких цепей основывается на расчетах электрической изоляции по критерию n -кратного превышения 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 многослойных печатных плат (объемное сопротивление).

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

Исследования выявили большую значимость токов утечек вдоль волокон стеклоткани между металлизированными отверстиями печатных плат и внутренними поверхностями перфораций экранов (слоев питания). На рис. 1 показано образование участка 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 многослойная печатная плата (МПП) содержит тысячи сквозных отверстий, их влияние на сопротивление 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 ста-

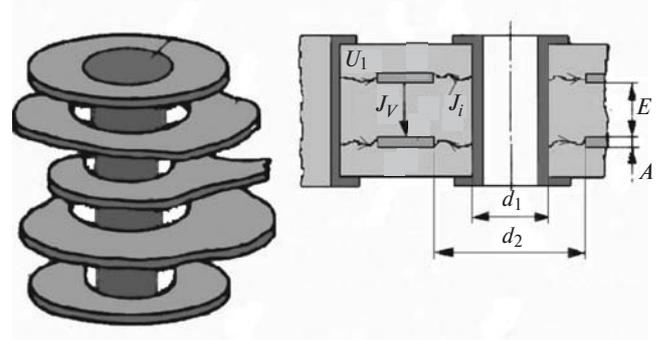


Рис. 1. Утечки тока в межслойном пространстве

новятся преимущественным источником отказов [2]. Помимо обычных причин такого явления, связанных с непрочностью сцепления связующего 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 на оценку токов утечки вдоль слоев МПП послужило основанием для проведения специальных исследований, в результате которых было установлено, что удельное внутреннее сопротивление r_i материалов МПП составляет $3 \cdot 10^{10}$ Ом·см в нормальных условиях и $1 \cdot 10^8$ Ом·см в условиях увлажнения. Выражение для расчета сопротивления коаксиального элемента изоляции имеет вид

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

где t – длина меньшего цилиндра, в данном случае – толщина фольги, см; d_1 – диаметр внутреннего электрода – диаметр металлизации отверстия, см; d_2 – диаметр внешнего электрода – диаметр перфорации слоя питания (экрана), см.

Таблица 1

Направление токов утечки	Значение сопротивления (числитель – расчет, знаменатель – норма), Мом, в условиях	
	нормальных	увлажнения
Между печатными проводниками	6,7 103/104	7/5
Между печатными проводниками и слоями питания (экранами)	2,1 105/104	100/5
Между слоями питания (по объему и вдоль слоев)	106/103	0,1/1

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 табл. 1 (габариты 360×360 мм, 12 слоев, 6000 отвер-

стей, толщина межслойной изоляции 0,15, минимальный изоляционный зазор между печатными проводниками 0,2 мм).

Особенности поведения электроизоляционных конструкций в условиях повышенной влажности заставляют 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 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 впечатление нарушения закона Аррениуса. При испытаниях плат на теплоустойчивость следует предусматривать этот процесс и давать необходимое время выдержки для установления равновесного состояния увлажнения изоляции, характерного для температуры 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 «усы» развиваются на свежообнаженной поверхности царапин, надрезов, соскобов и т.п., обнаруживаются на оловосодержащих покрытиях с большим содержанием олова (гальванические покрытия олово-кобальт, олово-висмут). Попытки «спровоцировать» образования «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 неустраняемые причины их влагонепроницаемости 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 — капиллярно-пористые тела, для которых характерна преимущественно физико-механическая связь влаги в микро- и макрокапиллярах. По этой причине влагопоглощение стеклотекстолитов в большой мере обусловлено адсорбцией влаги поверхностью стеклянных волокон и капиллярной полимолекулярной конденсацией влаги на границе *связующее—стекло*.

Размеры, число и характер пор в материалах печатных плат не зависят от температуры в той мере, в какой можно пренебречь зависимостью размеров пор и капилляров от теплового расширения. Поэтому, как показали исследования, для этих материалов характерна неактивированная сорбция влаги. В субмикроскопических порах, вероятно, по границам *стекловолокно—смола* влага конденсируется при влажности, соответствующей нормальным условиям.

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

При любых условиях проникновение молекул воды в толщу материала обусловлено процессами диффузии. В результате диффузии 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. В том случае, когда поглощенная влага способна образовывать водяные нити и пленки, пронизывающие весь изоляционный зазор или значительную его часть, уже весьма малое количество влаги приводит к чрезвычайно резкому ухудшению электрических свойств изоляции. В этом случае, как показали исследования, сопротивление увлажненной изоляции целиком зависит только от содержания в ее объеме влаги и не зависит от температуры, хотя

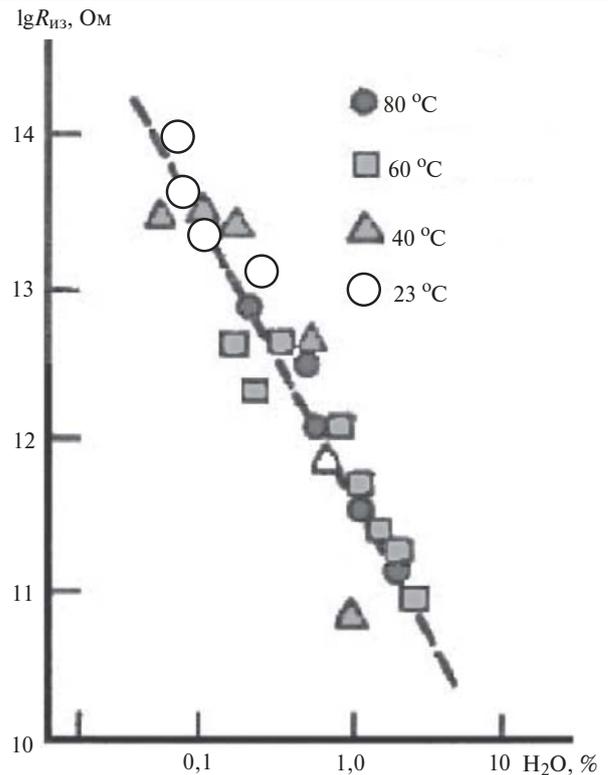


Рис. 2. Зависимость сопротивления изоляции от содержания влаги

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. Поэтому в течение примерно 5 мин увлажнения поверхностное сопротивление диэлек-

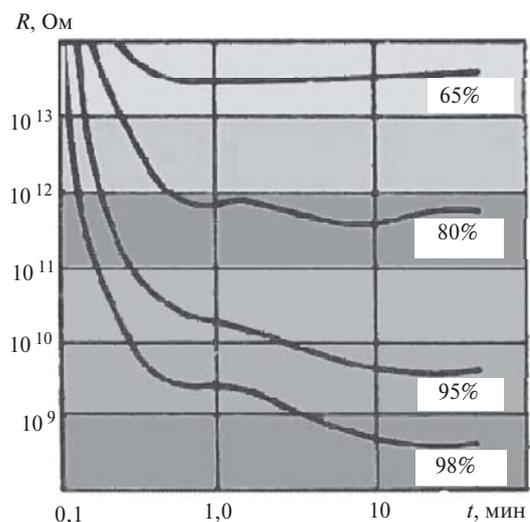


Рис. 3. Зависимость сопротивления изоляции от относительной влажности

трического основания резко падает, как показано на рис. 3. При помещении платы в сухую атмосферу поверхностное сопротивление также быстро восстанавливается.

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, поскольку 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, 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 из-за 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 проходит 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 – первоисточников механического расклинивания соприкасающихся поверхностей композитов с образованием полостей, заполненных растворами ионогенных продуктов разложения. В 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 быстрое перемещение 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 проявляется в быстром уменьшении сопротивления и заканчивается второй стадией разрушения изоляции – электрохимическим процессом образования металлических замыкающих мостиков. Ско-

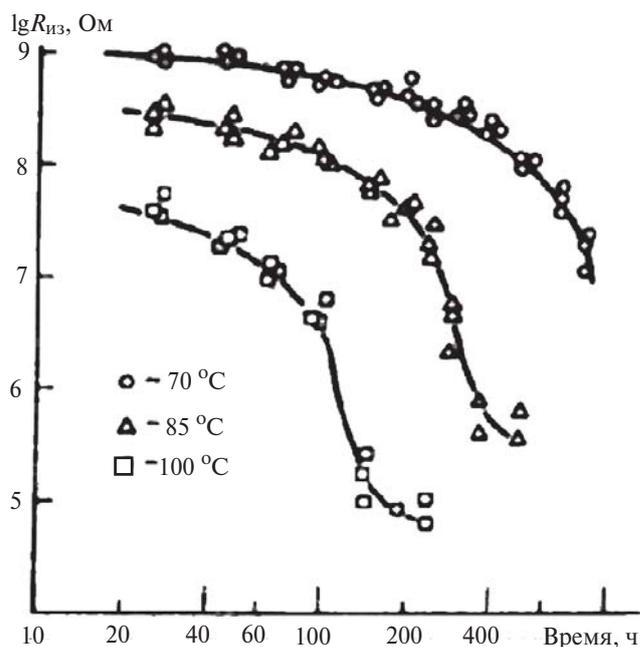


Рис. 4. Временная зависимость сопротивления изоляции

рость процесса 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 временной зависимости их сопротивления (рис. 4). На первом этапе большое значение электрического сопротивления пленок 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; снижается полярность звеньев макромолекул; уменьшается молекулярное взаимодействие.

Вместе с тем механизм диффузии набухания и гидратации при повышении температуры не меняется. В связи с этим процесс деградации изоляции подчиняется закону Аррениуса, что позволяет аппроксимировать результаты ускоренных испытаний при повышенных температурах на реальные усло-

Время до наступления отказа, ч

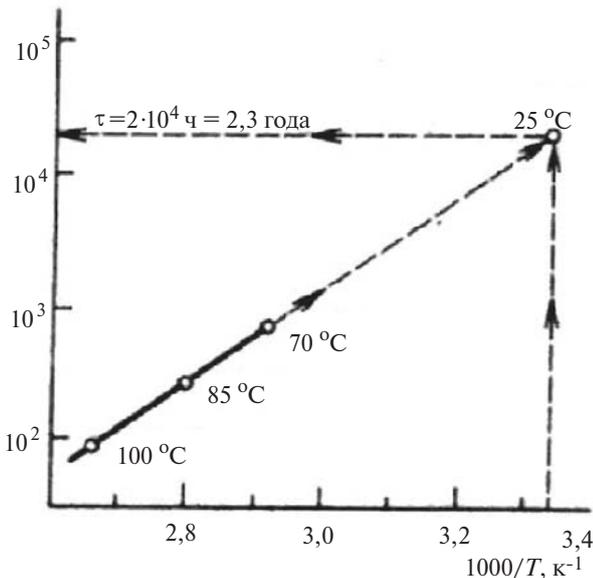


Рис. 5. Аппроксимация точек деградации изоляции на временную ось

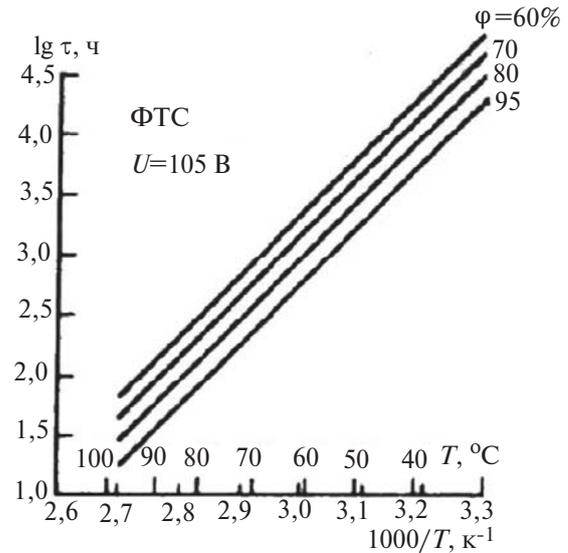


Рис. 6. Результаты ускоренных испытаний на длительную влагоустойчивость

вия эксплуатации, как это показано для стандартных лаковых пленок на рис. 5.

Деградация изоляционного основания МПП начинается с расщепления его слоев, отделения связующего от стеклянных волокон за счёт осмотических процессов и гидролиза. После смыкания полости между разнопотенциальными 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, модернизируя уравнение Аррениуса:

$$t_1 = aw^b \exp(E / kT), \tag{1}$$

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

Результаты ускоренных испытаний на длительную влагоустойчивость материала 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 $3 \cdot 10^3$ ч и для материала типа СТФ – $18 \cdot 10^3$ ч. Отличия этих материалов по составу и нанесу смолы приводят к заметным различиям в константах a, b и E уравнения (1), характеризующего их работоспособность в условиях повышенной влажности. В табл. 2 приведены параметры, описывающие начало деградации изоляции.

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

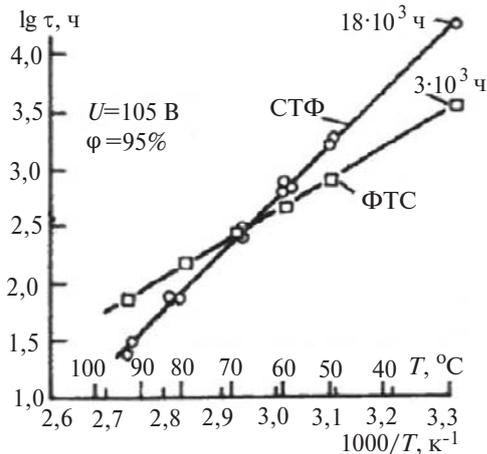


Рис. 7. Семейство кривых, характеризующее работоспособность внутренней изоляции МПП из материала ФТС

Таблица 2

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

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

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

или

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

Константы уравнения (2) являются предметом поиска. Более определенной представляется эмпирическая зависимость процессов деградации второго этапа от напряжения:

$$t_2 = c + a/U. \quad (3)$$

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, при диапазоне температур 50, 100 °С и относительной влажности 60, 90% постоянные уравнения (3) для 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 селек-

тивные (паяльные маски). Лаковое покрытие выполняет функции диффузионного барьера для проникновения влаги на поверхность платы. В этом состоят его влагозащитные функции. Однако необходимость применения лаковых покрытий состоит 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 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 до 8 ч. Дальнейшее ухудшение изоляционных свойств также замедляется из-за ограничения доступа влаги к поверхности платы через лаковое покрытие.

Применение лаковых покрытий эффективно только при условии тщательной очистки поверхностей, иначе осмотическое накопление влаги под лаковым покрытием неизбежно приводит к отказам изоляции. Необходимо принимать меры по предотвращению загрязнений поверхности печатных узлов в процессе эксплуатации, которые 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 — применение полугерметичных или герметичных конструкций (капсул, заливок, обволакивания и т.п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электротехническим материалам. Т.1/Под ред. Ю.В. Корицкого и др. — М.: Энергоатомиздат, 1986, 368 с.
2. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. — М.: Техносфера, 2005, 360 с.
3. Сайт НАСА (США): <http://npp.nasa.gov/WHISKER/video/index.html>
4. Бекишев А.Т., Медведев А.М., Сержантов А.М. Надежность электроизоляционных конструкций на основе композиционных диэлектриков. — Производство электроники: технологии, оборудование, материалы, 2009, № 1, с. 33–37.

[03.08.15]

Авторы: **Васильев Федор Владимирович** окончил Московский государственный авиационный институт (МАИ) в 1995 г. В 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование факторов, влияющих на процесс послойного синтеза методом лазерной стереолитографии». Заведующий кафедрой «Технология приборостроения» МАИ.

Медведев Аркадий Максимович окончил Московский энергетический институт в 1959 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию «Теоретические основы проектирования, контроля и испытаний электрических межсоединений в высокопроизводительных ЭВМ». Профессор кафедры «Технология приборостроения» МАИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 2, pp. 44–51.

Degradation Processes in Avionics Electric Insulation Structures

VASILYEV Fedor Vladimirovich (National Research University «Moscow Aviation Institute» – NRU «MAI», Moscow, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci.(Eng.)

MEDVEDEV Arkadii Maksimovich (NRU «MAI», Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The use of electric insulation structures applied in avionics is characterized by certain specific features, such as extreme conditions of their operation and compact sizes of insulation components, which entails difficulties in making them with a sufficient safety margin. At the same time, the low level of operating voltages has led to radical changes in the mechanisms governing insulation failures and in the relevant reliability assurance factors. Earlier, only electric and thermal breakdown were the main factors causing failures, whereas electrochemical failure processes have become typical for modern avionics, which are mainly pertinent to equipment designed for tropic and maritime applications. The users of aircraft equipment constructed on the basis of highly integrated electronic components faced in some or other way new insulation failure phenomena, the mechanism and corresponding measures for preventing which were not known. The article outlines the principles of calculating electric insulation structures made of composite materials, and the mechanism governing moistening and development of insulation degradation processes in printed circuit boards, which are the main structural component of electronics and, in particular, avionics, is considered.

Key words: avionics, electric insulation, electrochemical failure processes, composite materials

REFERENCES

1. **Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam. T.1/Pod red. Yu.V. Koretskogo i dr.** (Handbook on electrotechnical materials, vol.1/Edit by Yu.V. Koretskii et al.). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1986, 368 p.

2. **Medvedev A.M. Pechatnye platy. Konstruktsii i materialy** (Printed circuit. Construction and materials). Moscow, Publ. «Tekhnosfera», 2005, 360 p.

3. **Sait NASA (USA):** <http://nepp.nasa.gov/WHISKER/video/index.html>

4. **Bekishev A.T., Medvedev A.M., Serzhantov A.M. Proizvodstvo elektroniki: tekhnologii, oborudovaniye, materialy – in Russ.** (Electronics: Technology, Machinery, Materials), 2009, No. 1, pp. 33–37.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru
Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: etr1880@mail.ru