

УДК 621.315.592

Условия и критерии применения микросхем и полупроводниковых приборов индустриального уровня качества в космическом приборостроении

Ю. Л. Нуров

эксперт НЦСЭО, АО «Российские космические системы»

e-mail: ynikac@rniikp.ru

Аннотация. В статье рассматриваются мероприятия, которые рекомендуется реализовать при вынужденном использовании микросхем и полупроводниковых приборов индустриального уровня качества в пластиковых корпусах (МПК). Приводятся положительные и отрицательные характеристики МПК по сравнению с герметичными микросхемами. Представлена схема прохождения МПК в НЦСЭО, включая 100%-й входной контроль (ВК), отбраковочные испытания (ОИ), диагностический неразрушающий контроль (ДНК), выборочный разрушающий физический анализ (РФА) и сертификационные испытания (СИ). Обсуждается подход к определению надежностных характеристик партий МПК, прошедших комплекс всесторонних испытаний.

Ключевые слова: микросхема в пластмассовом корпусе, отбраковка, входной контроль, испытания на надежность, квалификационные испытания

Application Condition and Criteria of Foreign Microcircuits and Semiconductors Industrial Quality Levels in Plastic Packages in Space Instrument-Making (Space Devises)

Yu. L. Nurov

expert RCT CE, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: ynikac@rniikp.ru

Abstract. The article considers necessary action on using foreign microcircuits industrial quality levels in plastic packages (PEM) for space devises. It describes PEMs positive and negative features in compare with hermetic microcircuits. Here you will find the PEMs routing in the RTC SE including 100% incoming inspection, screening testing diagnostic nondestructive testing, sepling destructive physical analyses and the certification testing. The article considers an approach to the definition of reliability performances of PEMs lot going through the combination of comprehensive tests.

Key words: plastic encapsulated microcircuit, screening, incoming inspection, reliability testing, qualification testing

Введение

В начале девяностых годов прошлого века в США стали применять термин ВСП («лучшая коммерческая практика» — «best commercial practices»), относящийся к лучшим невоенным достижениям в создании компонентов коммерческого/индустриального применения. ВСП-компоненты отличались массовостью, серийностью производства, высоким качеством, надежностью и низкой стоимостью. Особенно это относилось к области микросхем и полупроводниковых приборов в пластиковых корпусах (МПК).

Известная директива Перри в июне 1994 г. предлагала создать все необходимые условия для применения ВСП-компонентов в системах военного назначения. Главная цель директивы Перри заключалась в использовании технических характеристик, спецификаций и стандартов для индустриальных схем; при этом предполагалось снижение стоимости военных систем без ухудшения их качества.

Были разработаны требования к системам качества изготовления и поставки микросхем, руководства по выбору ВСП-компонентов для использования в военных системах различного назначения и ряд других требований.

Со временем в качестве методологических подходов к применению микросхем индустриального уровня качества, в том числе МПК, для специальных целей, предлагалось использовать частично методы отбраковки и квалификации, изложенные в MIL PRF 38535, MIL-STD-883, JANTXV, JANS.

В настоящее время в США, Европе, Японии выпущены документы (руководства), в которых излагаются требования и условия, которым должны удовлетворять МПК для их применения в космической радиоэлектронной аппаратуре (РЭА).

Эти требования настоятельно рекомендуют приобретать МПК у надежного поставщика, проводить этим компонентам расширенный комплекс испытаний, включая ускоренные испытания на безотказность, следовать определенным правилам обращения и хранения пластиковых компонентов, проводить статистический анализ надежности характеристик испытанных компонентов и вводить их в базу данных для последующего использования.

Достоинства и недостатки интегральных микросхем в пластиковых корпусах индустриального уровня качества

По сравнению с микросхемами специального применения (Space, Military, Hi-Rel) МПК имеют много преимуществ, основные из которых:

- непрерывность и массовость выпуска, что положительно влияет на стабильность и повторяемость основных технических характеристик, которые, в свою очередь, определяют качество и надежность партий микросхем;

- гораздо большие функциональные возможности МПК по сравнению с более консервативными возможностями микросхем специального применения. Это особенно заметно при сравнении с функциональными возможностями СБИС микропроцессоров, микроконтроллеров, ОЗУ, ПЗУ, ПЛИС;

- малые габариты, вес, что особенно важно при построении радиоэлектронных систем космического применения;

- низкая чувствительность к механическим вибрационным нагрузкам и влиянию линейного ускорения, которое в герметичных микросхемах приводит к обрыву внутренних проводников, расположенных в свободном подкорпусном пространстве;

- возможность приобретения в короткие сроки и по низкой цене;

- некоторые зарубежные авторы считают также, что производство МПК подвергается более частому мониторингу, чем это требует MIL-STD-883.

К сожалению, МПК имеют ряд существенных ограничений с точки зрения применения их в космическом приборостроении. К этим ограничениям относятся:

- негерметичное исполнение, позволяющее влаге проникать через пластиковую оболочку, что может привести как к коррозии со временем металлических соединений, площадок и в итоге к отказу микросхемы, так и к явлению растрескивания (popcorn) МПК при пайке выводов из-за давления образовавшихся паров влаги на пластмассовую оболочку;

– МПК имеют несколько меньший диапазон рабочих температур ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с корпусными герметичными микросхемами ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$);

– более короткое время жизненного цикла, приводящего к проблеме, называемой за рубежом *obsolescence* (снятие с производства), что требует создания необходимых складских запасов для повторяемых выпусков продукции;

– неоднородность партий;

– отсутствие данных по гарантированной радиационной стойкости;

– отсутствие документального подтверждения надежных характеристик.

Несмотря на очевидные недостатки МПК для космического применения, в США не прекращаются работы по исследованию условий и критериев применения их в военной и космической радиоэлектронной аппаратуре.

В 2003–2004 гг. NASA (США) почти одновременно выпустило две инструкции: PEM-INST-001 «Instruction for Plastic Encapsulated Microcircuit (PЭМ) Selection, Screening and Qualification» и EEE-INST-002 «Instruction for EEE Parts Selection, Screening, Qualification», первая из которых полностью посвящена МПК, а во второй МПК и полупроводниковым приборам (ППП) посвящены отдельные разделы: раздел M4 «Microcircuit, plastic encapsulated» и раздел S1 «Semiconductor, devices discrete».

В этих документах подчеркивается, что МПК изначально были сконструированы для использования в ремонтируемых системах, где их легко было заменить.

Неиспользование их в военной и космической аппаратуре объяснялось в основном двумя причинами:

– ограниченным по сравнению со специальным применением диапазоном рабочих температур и абсорбцией влаги в связи с негерметичным исполнением;

– негарантированным показателем надежности МПК при неоднородности выпускаемых партий.

Необходимо было разработать методы и процедуры квалификации и отбраковки для раннего выявления дефектов в партиях МПК и внедрить раннюю отбраковку ненадежных элементов в партии

для возможности использования этой «улучшенной» партии в аэрокосмической промышленности.

Однако поскольку качество, необходимое для космического использования, не было заложено в МПК при конструировании и изготовлении, нельзя гарантировать, что МПК будут иметь тот же уровень качества, что и ЭРИ, специально изготовленные для космического применения.

В любом случае МПК рекомендуется применять только в тех случаях, когда по тем или иным причинам нельзя приобрести к определенному сроку микросхемы с необходимыми функциональными характеристиками категорий Space, Military, Hi-Rel, промышленные микросхемы в герметичных корпусах, микросхемы из складских запасов (COTS).

Прохождение ЭРИ промышленного уровня качества в НЦ СЭО

В НЦ СЭО АО «Российские космические системы» в течение многих лет и в настоящее время в бортовой аппаратуре многих заказов применяется электронная компонентная база промышленного уровня качества, в том числе и МПК. Для проведения их испытаний разрабатывались, непрерывно совершенствовались и реализовывались программы входного контроля, отбраковочных испытаний, диагностического неразрушающего контроля, сертификационных испытаний.

За год в среднем проводились испытания до 150 тыс. МПК.

На начальном этапе НЦ СЭО анализирует предварительный Перечень ЭРИ для определенного заказа, подготовленный техническим подразделением института, разработчиками и технологами, выдает предложения по его коррекции, подписывает окончательный вариант Перечня и выдает необходимые задания на подготовку рабочих мест испытательного центра к выполнению всех требуемых испытательных процедур для каждого типа ЭРИ. В это же время подразделение закупок осуществляет через дилеров приобретение заявленных ЭРИ.

При покупке МПК очень важно выбрать надежного квалифицированного поставщика или

в крайнем случае авторизированного дилера. Желательно, чтобы изготовитель МПК имел опыт производства компонентов специального назначения. Закупающее подразделение АО «Российские космические системы» по возможности должно быть документально осведомлено о системе управления качеством у изготовителя, технологии производства, объеме испытаний МПК (функциональный контроль, отбраковочные испытания), организацией обращения с компонентами, их хранении, методами и результатами надежностных испытаний, гарантией поставок в срок и др. Уровень влажности закупаемых МПК должен быть не ниже третьего [1].

НЦ СЭО выпускает или уточняет программы проведения входного контроля (ВК), отбраковочных испытаний (ОИ), диагностического неразрушающего контроля (ДНК), сертификационных испытаний (СИ); выпускает информационные материалы, инструкции, другую НДТ.

Очень важно на этапе входного контроля проверить полноту и достаточность сопроводительной документации и детально оценить внешний вид МПК.

Для МПК на этапе ВК должна проводиться операция проверки хотя бы относительной однородности партии. Поскольку, в отличие от микросхем Military и Space, промышленные компоненты могут быть изготовлены не из одной и той же пластины, не в одно и то же время, не на одной и той же производственной линии, не пронумерованы изготовителем, выборочные испытания на квалификацию (сертификацию) могут быть недостоверными для распространения их результатов на всю партию. Одним из наиболее простых методов определения однородности партии какого-то определенного типоминимала микросхемы может быть проверка информативных электрических параметров этой партии по ужесточенным нормам, которые устанавливаются в результате статистической обработки результатов измерений партии. В качестве информативного параметра для определения однородности партии чаще всего выбираются токи, протекающие в цепи питания испытуемой микросхемы. По степени разброса величин этих токов и характеру их распределения можно судить в какой-то степени об однородности элементов в партии. Большую уверенность в однород-

ности партии дает последующая электротермотренировка и анализ изменения разброса и распределения величин информативного параметра. Обычно допустимыми отклонениями считается разброс информативного параметра в пределах $\pm 10\%$.

Электрические параметры должны измеряться при трех рабочих температурах: нормальной, минимальной и максимальной. Результаты измерений заносятся в базу данных и хранятся в ней не менее 10 лет.

Следующий этап — проведение статической или совмещенной статико-динамической электротермотренировки (ЭТТ). Желательно проводить по согласованию с изготовителем (если это возможно) электротермотренировку МПК при температуре $+125^\circ\text{C}$ в течение 240 ч, после чего рассчитывается дрейф информативного параметра. Положительная температура ЭТТ не должна превышать температуру стеклования пластика (обычно эта температура лежит в пределах $+140\text{--}+150^\circ\text{C}$).

На финальной стадии проводят контроль электрических параметров и функционирования при нормальной, минимальной и максимальной рабочих температурах. Максимально допустимый процент брака не должен превышать 10%.

В последнее время начал проводиться функциональный контроль микросхем на максимальной рабочей тактовой частоте в широком диапазоне рабочих температур и напряжений питания, что позволяет значительно повысить эффективность испытаний.

Из партии МПК, прошедшей весь комплекс 100% испытаний (ВК, ОИ, ДНК), формируются случайным образом выборки для проведения СИ и испытаний на радиационную стойкость. Количество элементов в выборках определены в программах испытаний, которые согласованы с Заказчиком. Остальные элементы вместе с предварительным заключением передаются на склад и далее в цеха без права предъявления Заказчику до завершения СИ.

Испытания МПК на радиационную стойкость представляют отдельную проблему [2] и в настоящей статье не рассматриваются.

Схема прохождения микросхем промышленного уровня качества, реализованная в НЦ СЭО, представлена на рис. 1.

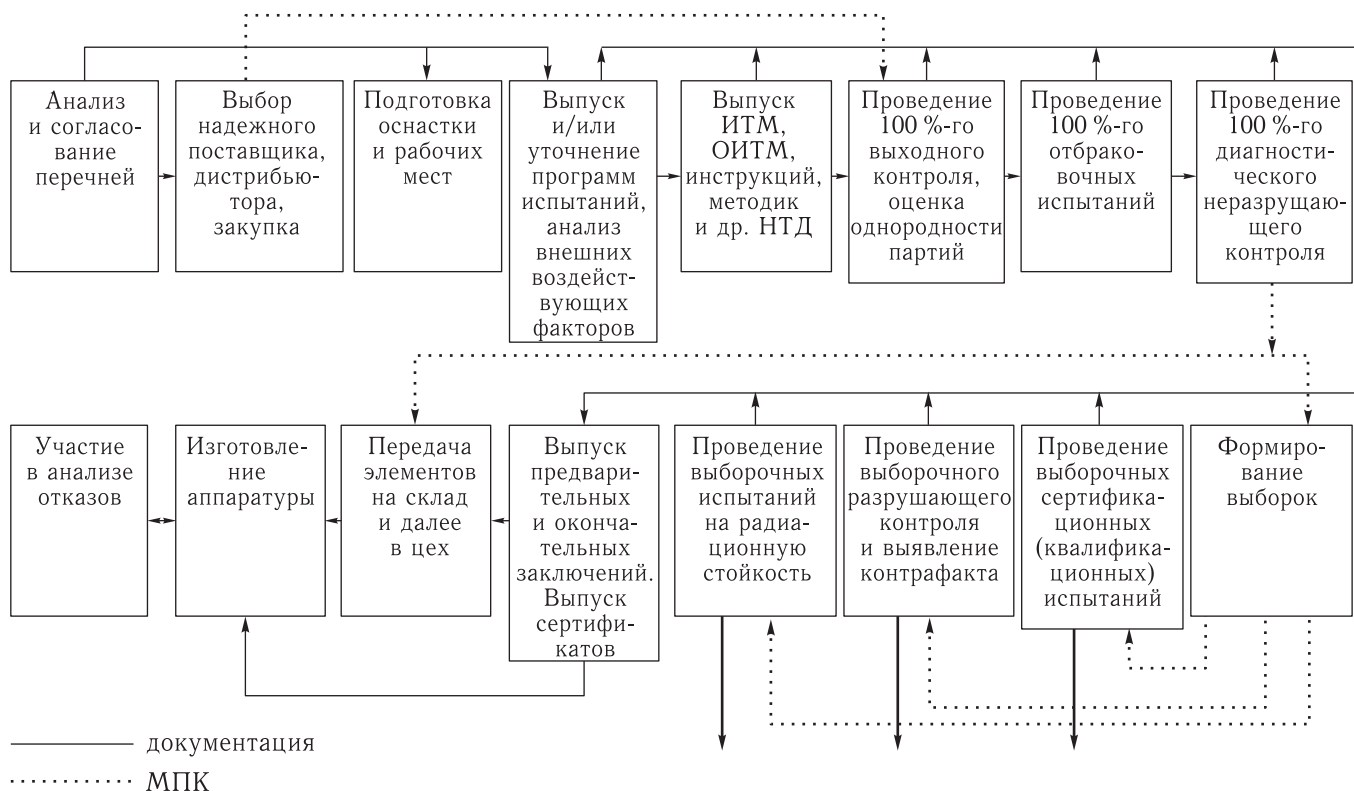


Рис. 1. Прохождение микросхем и полупроводниковых приборов в пластиковых корпусах

Сертификационные испытания

В НЦ СЭО СИ МПК проводятся в следующем объеме:

- испытания на паяемость;
- контроль внешнего вида;
- контроль параметров в нормальных условиях и при предельных температурах;
- термоциклирование;
- испытание на акустическом микроскопе;
- испытания на влагостойкость;
- испытания на безотказность.

По результатам испытаний составляется протокол, который служит основанием для выдачи окончательного Заключения, согласованного с ВП, о возможности использования данной партии в РЭА конкретного заказа. Объем СИ, реализуемый в настоящее время в НЦ СЭО, несколько отличается от объема сертификационных (квалификационных) испытаний, рекомендуемых для МПК инструкциями NASA PEM-INST-001 и INST-002

(раздел М4). Во-первых, акустическая микроскопия в зарубежных стандартах проводится на начальном этапе после визуального контроля внешнего вида и после испытаний на безотказность. Во-вторых, часть элементов выборки подвергается тесту HAST (тест с высоким ускорением стресса; обычно +130 °С при 85 % влажности). В-третьих, кроме испытаний на паяемость используется также испытание на устойчивость к пайке.

Последовательность сертификационных (квалификационных) испытаний, рекомендуемая этими стандартами, представлена на рис. 2.

Важно отметить, что размер выборки, показанный на рисунке, соответствует принятому в НЦ СЭО, а в вышеприведенных инструкциях эта выборка существенно больше.

В НЦ СЭО ведутся работы по гармонизации отечественного и зарубежного подхода к объему и последовательности сертификационных (квалификационных) испытаний МПК и ППП.

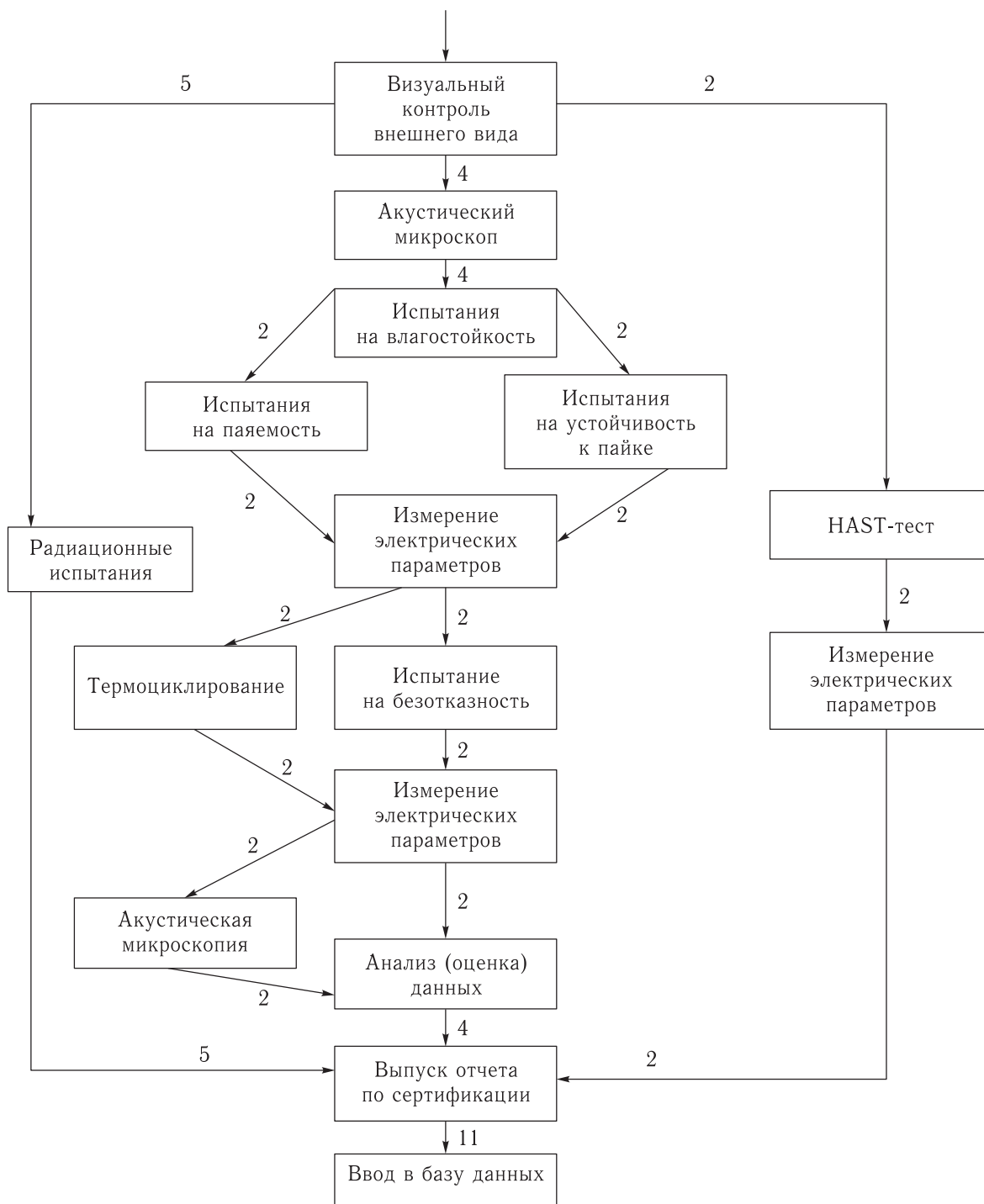


Рис. 2. Последовательность проведения сертификационных (квалификационных) испытаний МПК

Разрушающий физический анализ

В настоящее время в НЦ СЭО проводит разрушающий физический анализ (РФА) только отечественных микросхем, которые сертификаци-

онным испытаниям не подвергаются. Мы считаем, что МПК в обязательном порядке должны подвергаться выборочному РФА. Оборудование для рентген-контроля (расположено на заводе РКП), акустический микроскоп (расположен

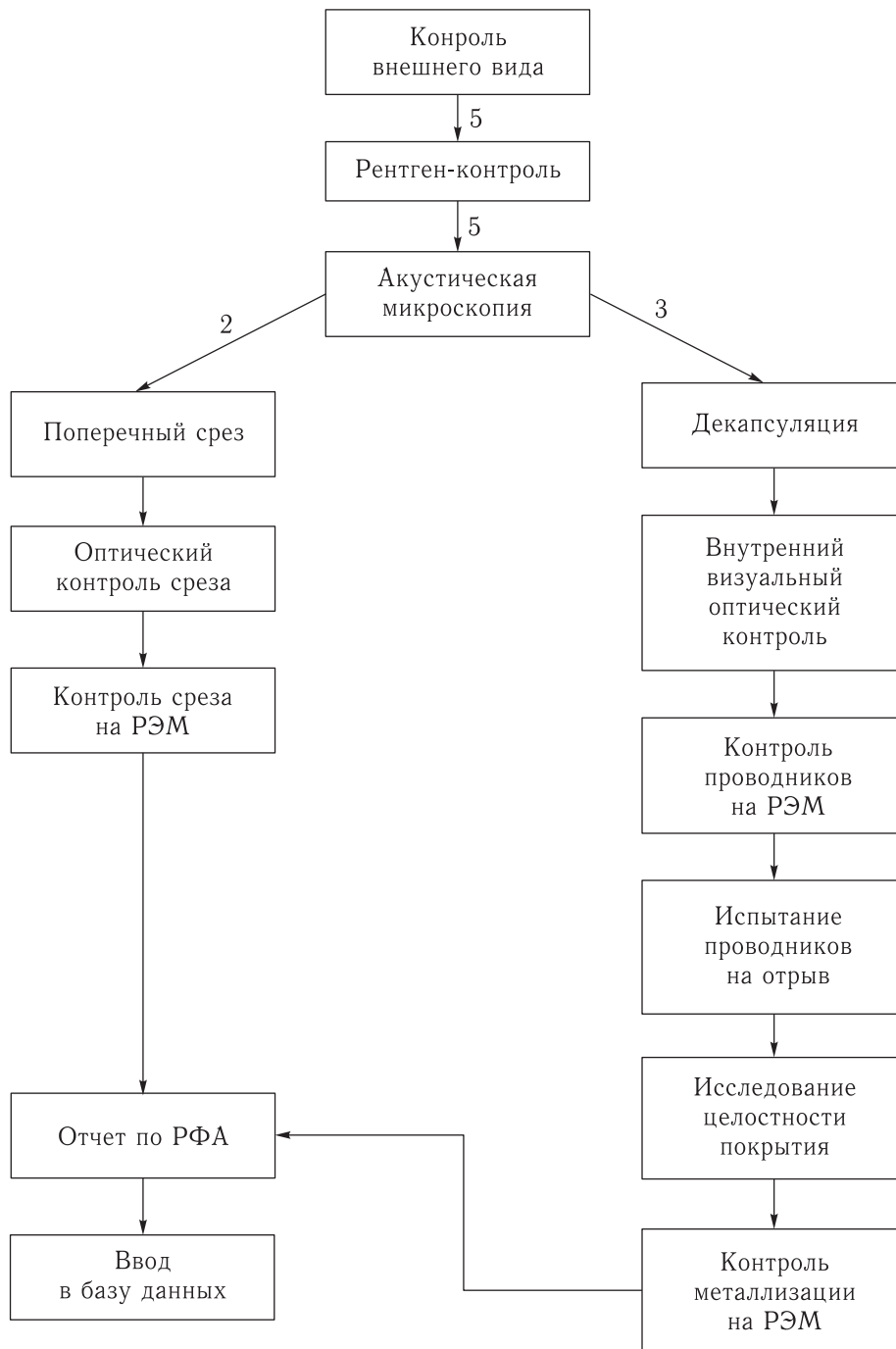


Рис. 3. Последовательность проведения РФА МПК

на территории ЗАО «НПО КП»), растровый электронный микроскоп, оптическая аппаратура, тестер для испытаний вскрытой микросхемы на прочность внутренних проводников и сдвига кристалла, химлаборатория имеются в НЦ СЭО. Ведутся работы по химической декапсуляции МПК. Квалификация

персонала сектора позволяет проводить РФА, подготавливать полноценные отчеты по его проведению и вводить результаты РФА МПК в базу данных.

На рис. 3 показаны типичный объем и последовательность проведения РФА МПК, рекомендуемая инструкциями РЕМ-INST-001 и INST-002.

Желательно проводить РФА МПК до проведения отбраковочных испытаний на выборке 5 шт. Для эффективного проведения РФА МПК желательно также гармонизировать отечественный и зарубежный подходы к каждой операции РФА. Зарубежный материал по операциям

- внешний визуальный контроль;
- рентгенография;
- акустическая микроскопия;
- поперечный срез;
- внутренний визуальный контроль;
- испытания на РЭМ

с оценочными критериями по каждой операции приводится в двух вышеуказанных инструкциях NASA.

НЦ СЭО необходимо завершить работу по химическому травлению МПК, приобрести установку для плазменного травления и арендовать (или приобрести) акустический микроскоп и рентгено-телевизионную установку.

Отбраковка контрафактных МПК

Сегодня на тему контрафактности многих изделий электронной техники, и в частности МПК, написано много статей, инструкций, выпущен ряд стандартов, проведены семинары и даже конференции [3]. Наиболее полная программа решения проблем с контрафактными компонентами изложена в американской программе CCAP101 «COUNTERFEIT COMPONENTS AVOIDANCE PROGRAM, CERTIFICATION FOR» (2013 г.).

Следует подчеркнуть, что необходимость приобретения промышленных МПК и ППП у официальных поставщиков или дистрибьюторов чрезвычайно важна не только с точки зрения применения этих элементов в специальном приборостроении, но и с точки зрения сведения к минимуму возможности засорения приобретаемых партий контрафактными ЭРИ.

Контрафактные МПК могут быть выявлены практически на всех этапах и операциях испытаний МПК и ППП, показанных на рис. 1, особенно на операциях:

- контроль внешнего вида и сопроводительной документации;

- электротермотренировка и оценка дрейфа;
- параметрический и функциональный контроль, особенно на высоких тактовых частотах, *m*-метрия, квазистатические токи утечки, ВАХ;
- растровая электронная микроскопия;
- рентген-контроль;
- внутренний визуальный контроль после декапсуляции;
- акустическая микроскопия;
- паяемость;
- влагостойкость.

Фирма SovTest предлагает новый тестер, полезный для выявления контрафактных микросхем. Он основан на сравнении параметров каждого отдельного вывода с параметрами хорошо известного годного устройства. При этом измеряются только напряжения между каждым выводом и шиной земли, между каждым выводом и шиной питания, между каждым выводом относительно других. Разновидность этого метода — метод сравнения импедансов информативных цепей известной (хорошей) и проверяемой микросхемы.

Ни одно отдельно взятое испытание не гарантирует отсева контрафактного элемента, но комплекс испытаний, проводимый в НЦ СЭО, сводит вероятность проникновения контрафактных МПК в РЭА к минимуму.

Надежностные характеристики

В материале «Selection Guide for electronic components predictive reliability models» (2009 г.) фирмы IMdR приводится расчет λ -характеристик по различным методикам для различных условий эксплуатации, включая спутниковую РЭА для низких и геостационарной орбит.

Анализировались методики расчета λ -характеристик ЭРИ и оборудования по справочникам: MIL-HDBK-217F, RDF-93, UTE-C 80810, FIDES и MIL-HDBK 217 Plus.

Результирующие λ -характеристики, рассчитанные по моделям, приведенным в вышеуказанных справочниках, отличаются в десятки раз для одного и того же оборудования. Так, для низких орбит λ -характеристики по моделям UTE-C 80810, MIL-HDBK-217F, RDF-93 почти совпадают,

а по моделям FIDES и MIL-HDBK 217 Plus отличаются примерно в 20 раз. Для геостационарных орбит картина сохраняется, за исключением того, что к моделям FIDES и MIL-HDBK 217 Plus добавляется модель UTE-C 80810.

По материалам всех справочников можно оценить надежность характеристик МПК для условий применения в космической аппаратуре.

Несколько лет назад автором была предпринята попытка оценить надежность промышленных микросхем по справочнику MIL-HDBK-217F. В этом справочнике приводится эмпирическая формула, по которой можно определить коэффициент качества πq , находящийся в пределах от 2 (второй военный уровень качества) до 10 (промышленный уровень качества):

$$\pi q = 2 + \frac{87}{\Sigma K}, \quad (1)$$

где K — коэффициент, учитывающий объем проведенных отбраковочных испытаний.

Коэффициент πq входит в формулу

$$\lambda = \lambda b \cdot \pi t \cdot \pi L \cdot \pi e \cdot \pi q,$$

где πt — коэффициент, учитывающий температурные условия работы МПК в РЭА;

πL — коэффициент изученности;

πe — коэффициент, учитывающий окружающие условия, в которых используются МПК;

λb — базовая интенсивность отказов для конкретного класса МПК.

Формула (1) не учитывает проведение 100 %-го диагностического неразрушающего контроля и выборочного контроля при проведении сертификационных испытаний, включающих испытания на безотказность. Была предложена другая модифицированная формула:

$$\pi q = 1 + \frac{1}{1 + \Sigma n} + \frac{87}{\Sigma K}, \quad (2)$$

в которой учитывается вклад этих испытаний в снижение коэффициента πq .

В соответствии с MIL-HDBK-217F в качестве коэффициентов K использовались коэффициенты:

$K_1 = 50$ (термоциклы, максимальная положительная и отрицательная рабочие температуры, контроль внешнего вида);

$K_2 = 36$ (электротермотренировка в течение 240 ч);

$K_3 = 11$ (радиография);

$$\Sigma K = 97.$$

В качестве дополнительных коэффициентов n использовались:

$n_1 = 2$ (ДНК по ужесточенным нормам);

$n_2 = 3$ (дрейф информативного параметра);

$$\Sigma n = 5.$$

В итоге получено:

$$\pi q = 1 + \frac{1}{1 + 5} + \frac{87}{97} = 1 + 0,166 + 0,897 = 2,063 \approx 2.$$

Именно эта оценка надежности микросхем была использована и согласована с МО РФ при расчете надежности аппаратуры БИНС для изделия ГЛОНАСС. Работу по уточнению формулы (2) следует продолжить, т.к. в ближайшее время МПК будут подвергаться РФА.

Что касается подтверждения надежностных характеристик МПК, прошедших ускоренные испытания, представляет интерес работа Н. Ливингстона SSB-1 «Guidelines for Usiug Plastic Encapsulate Microcircus and Semiconductors for Military application» (2004 г.). В ней автор рассматривает ускоренные испытания, применяемые для МПК, коэффициенты ускорения, получаемые при реализации этих испытаний, приводит методику расчета интенсивности отказов МПК. На рис. 4 показаны четыре вида стрессовых воздействий на МПК (температура, влага, термоциклирование, повышенное напряжение).

Если для подтверждения приемлемой интенсивности отказов (ноль отказов при доверительной вероятности 90 %) провести эксперимент, в котором партию МПК (40 шт.) подвергнуть испытанию на влагостойкость (температура +93 °С при влажности 90 %) и электротермотренировке при той же температуре в течение 1000 ч (количество приборочасов $t = 40\,000$), то при условии, что в эксплуатации эта партия элементов используется во влажности 20 % и при температуре +40 °С, можно показать, что величина λ будет равна 5 фитам.

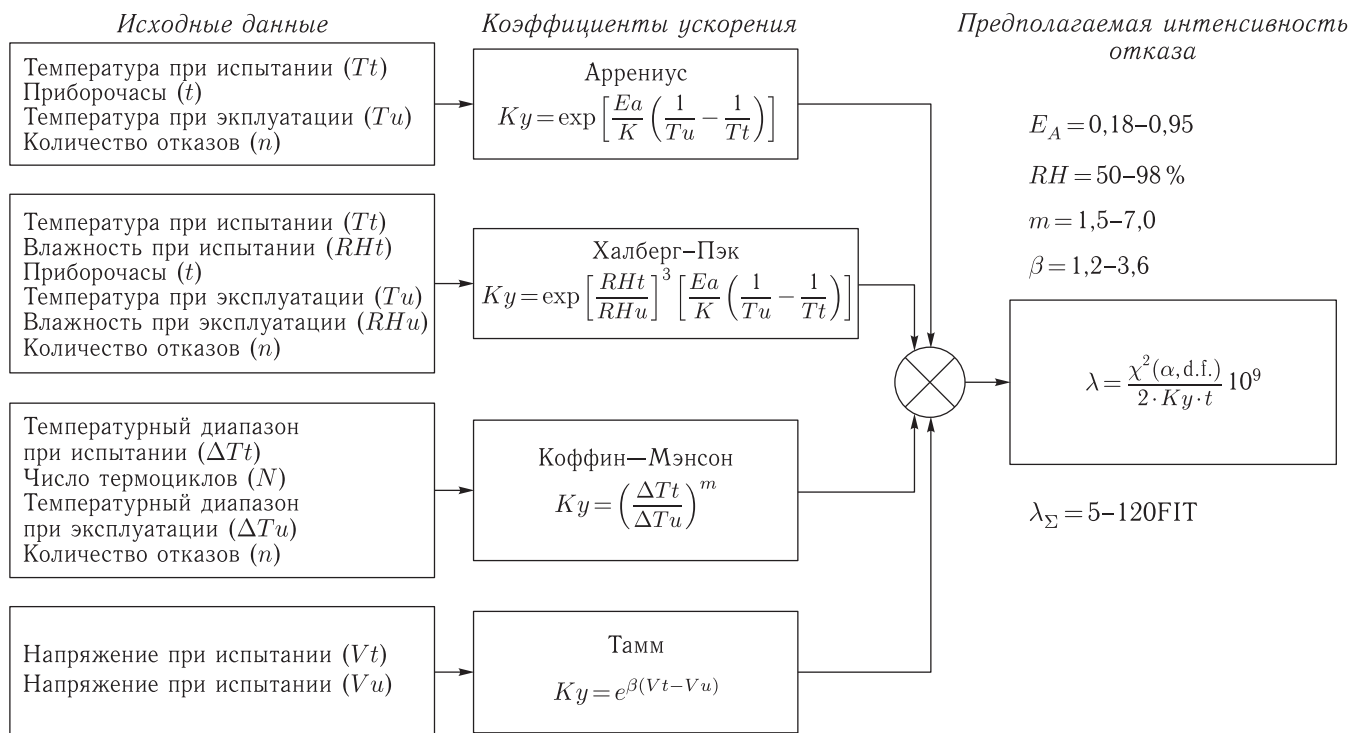


Рис. 4. Определение интенсивности отказов по результатам ускоренных испытаний МПК

Действительно, коэффициент ускорения

$$K_y = \left(\frac{RH_t}{RH_u}\right)^3 \exp\left[\frac{Ea}{K} * \left(\frac{1}{Tu} - \frac{1}{Tt}\right)\right] \left(\frac{0,9}{0,2}\right)^3 \times \exp\left[\frac{0,9}{8,6171 * 10^{-5}} * \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{366}\right)\right] = 114\,688;$$

интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{\chi^2(a, d.f.)}{2 \cdot K_y \cdot t} = \frac{4,605}{2 \cdot 11\,468 \cdot 40\,000} = 5,02 \cdot 10^{-9}, \text{ т. е. } \approx 5 \text{ фит.}$$

Для обеспечения вероятности безотказной работы аппаратуры, равной 95% при количестве МПК в приборе $n_n = 100$ шт. в течение времени эксплуатации $t = 7$ лет, интенсивность отказов МПК должна быть

$$\lambda_3 = \frac{1 - P}{n_n \cdot t_3} = \frac{1 - 0,95}{100 \cdot 61\,320} = 8,15 \cdot 10^{-9} = 8 \text{ фит.},$$

что согласуется с интенсивностью отказов, подтвержденной ускоренными испытаниями, приведенными выше.

Выводы

Несмотря на активно ведущиеся работы по импортозамещению, мы предполагаем, что в ближайшие 3–4 года потребность в МПК останется, хотя их количество в целом сократится.

МПК должны применяться в исключительных случаях, когда их невозможно заменить на микросхемы более высокого уровня качества из-за требуемых больших функциональных возможностей и сжатых сроков на закупку и изготовление аппаратуры.

При закупке МПК для космического применения необходимо приложить максимальные усилия для закупки у основного изготовителя или официального дилера и с максимально возможной документацией, относящейся к ее качеству.

Особенно внимательно следует отнестись к оценке однородности закупаемых партий МПК. Каждая партия МПК должна пройти 100%-й входной контроль с тщательным контролем сопроводительной документации и внешнего вида, включая габаритные размеры и вес, 100%-е диагностический

неразрушающий контроль и выборочные сертификационные испытания.

В составе выборочных испытаний настоятельно рекомендуем включить РФА, дополняющий возможность выявления контрафактных микросхем.

Испытания должны совершенствоваться и проводиться высококвалифицированным персоналом на аттестованном оборудовании, в чистых помещениях при соблюдении требований обращения с элементами, их транспортировки и хранения.

Результаты измерений должны анализироваться, обрабатываться и храниться в базе данных.

Список литературы

1. IPC/JEDEC J-5TD-020C. Moisture/Reflow Sensitivity classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devices 2004.
2. *Ужегов В. М.* Проблемные вопросы обеспечения стойкости бортовой аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений. Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2015», Санкт-Петербург, 2015.
3. *Кононов В. К., Салова Е. В.* Новые стандарты в области подтверждения соответствия и предотвращения контрафакта, подделок. Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2015», Санкт-Петербург, 2015.