

УДК 621.382.049.77+629.78

МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

© 2012 А. В. Наседкин, С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Предложен алгоритм проведения производственных испытаний электронных узлов. Рассмотрены особенности динамических испытаний. Выбраны испытательные воздействия. Определено время проведения испытаний для линейной модели изменения параметров электрорадиоизделий.

Производственные испытания, алгоритм, испытательные воздействия, линейная модель, время испытаний.

Введение

Одной из тенденций современного рынка электроники является повышение требований к надежности изделий. Отказы изделий космической промышленности приводят к большим финансовым потерям ввиду невозможности или дороговизны выявления и ремонта отказа, произошедшего на объекте, находящемся в космосе. К тому же, в некоторых случаях потери могут исчисляться не только деньгами, но и человеческими жизнями.

Одной из основных проблем надёжности радиоэлектронного изделия российских производителей космической и военной промышленности, возникшей после появления директивы об отходах радиоэлектронного и электрооборудования (WEEE-Waste Electrical and Electronic Equipment) и директивы о сокращении опасных веществ в радиоэлектронном и электрооборудовании (RoHS-Restriction of Hazardous Substances), одобренных Европейским Сообществом в начале этого века, является надёжность паяного соединения выводов электрорадиоизделия (ЭРИ) с бессвинцовым покрытием с использованием свинецсодержащего припоя. В настоящее время отечественная радиоэлектронная промышленность только частично обеспечивает разработчиков радиоэлектронной аппаратуры необходимыми изделиями электронной техники, а значит, им приходится прибегать к использованию импортных компонентов, которые в

большинстве случаев выпускаются в общепромышленном исполнении (“industry”) и не содержат в составе финишного покрытия свинец. В настоящее время в литературе очень мало внимания уделяется вопросам качества и надёжности комбинированных или смешанных паяных соединений, когда сочетаются бессвинцовые и свинцовые материалы. При этом, как правило, рассматривается задача пайки компонента с покрытием выводов, содержащим свинец, бессвинцовым припоем, а не наоборот.

Все эти факторы заставляют задуматься о проведении испытаний на надёжность изделий, в которых использовалась комбинированная пайка, для создания выводов о приемлемости применения их в составе аппаратуры космического и военного назначения. Однако условия, выдвигаемые заказчиками, предполагают длительный срок активного существования изделия, при котором обычные методы испытаний становятся неприемлемыми из-за большого времени их реализации. Ввиду этих ограничений на первый план выходят методы ускоренных испытаний, которые позволяют значительно сократить время исследования, а также уменьшить его стоимость.

Динамические испытания

Динамические испытания – испытания изделий воздействием динамических факторов различной физической природы, например, удар, вибрация, линейное

ускорение, тепловое воздействие, тестовая диагностика. Они представляют собой многоплановую, трудоёмкую и дорогостоящую процедуру, требующую для своего осуществления сложного оборудования, оснастки, аппаратурного и методического обеспечения, квалифицированного персонала. Динамические испытания, в зависимости от целевой установки и особенностей конкретного изделия, могут быть высокоинтенсивными и диагностическими. Высокоинтенсивные испытания применяются, например, для определения ударной и вибрационной устойчивости или прочности изделий, а диагностические – для выявления дефектов изготовления или полученных в ходе эксплуатации изделия [1].

К высокоинтенсивным динамическим испытаниям сложных изделий можно отнести ударные испытания на аварийные воздействия [2], а также вибрационные испытания устройств с высокочастотными резонансными характеристиками составных частей [3]. Можно отметить две важные особенности таких испытаний [1]:

1) уникальность, однократность, невоспроизводимость;

2) необходимость применения высоконадёжной, высококачественной аппаратуры и соответствующего методического обеспечения.

В данной работе предложен алгоритм ускоренных производственных испытаний паяных соединений электронных узлов (рис. 1).

Выбор испытательных воздействий

1. Общие положения

Целью ускоренных испытаний является достижение состояния отказа или накопления повреждений вследствие действия определённого механизма разрушения, но за время меньшее, чем потребовалось бы при эксплуатации изделия. Для достижения этого существует несколько общих способов:

- Интенсивность параметров, от которых зависит долговечность, может быть повышена для сокращения долговечности.

- Величина параметров, влияющих на долговечность, может поддерживаться на расчётном уровне, но воздействие выполняется с повышенной частотой, что приводит к сокращению продолжительности испытаний.

- Имеется также возможность применения этих двух подходов комбинированно.

Особую важность имеет установление соотношения между ускоренным испытанием и реальными условиями эксплуатации, которые подвергаются ускорению, без этого любые выводы могут быть в корне неверными.

Хотя использование ускоренных испытаний может быть опасным, поскольку они вносят факторы неопределённости, избежать их в общем случае нельзя, потому что требуемый срок активного существования слишком велик для проведения испытаний в более реалистичных условиях.

Для выделения различных процессов разрушения существуют различные типы испытаний. Для ускорения механизмов разрушения, от которых зависит долговечность паяного соединения, необходимо выполнить испытания на тепловую усталость, тепловой удар и вибрационные испытания. Выбор типа и условий испытаний должен осуществляться на основании соответствующих механизмов отказа или повреждения и условий эксплуатации.

2. Термоциклирование

При термоциклировании тест-платы подвергаются поочередному воздействию высоких и низких температур с определёнными временами выдержки. Во избежание теплового удара скорость изменения температуры не должна превышать 20°C/мин. Для создания повреждений от процессов усталости/ползучести, с учётом космической области применения, необходим диапазон температур от -30°C до +80°C с выдержками порядка 15 минут при определённых значениях температур.

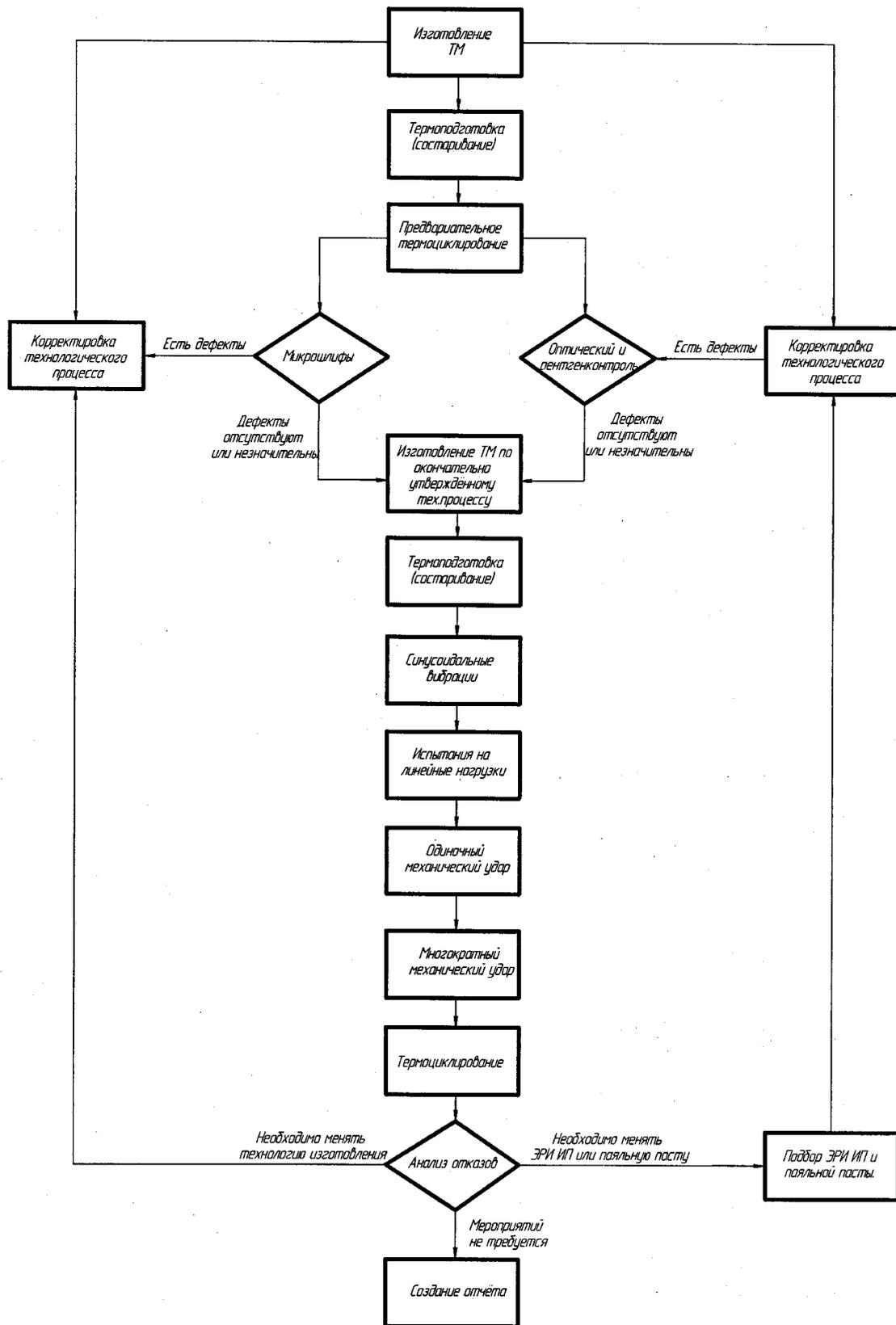


Рис. 1. Алгоритм ускоренных производственных испытаний

3. Вибрация

3.1. Условия воздействия случайной вибрации

По результатам исследований, спектральный состав вибраций, воздействию которых подвергается электронная аппаратура, распределён в широком диапазоне частот. Это означает, что вибрации любой частоты присутствуют одновременно в различных сочетаниях интенсивности. Эксперименты, проводимые в управляемых условиях, показали, что широкополосное воздействие при испытаниях можно успешно моделировать, применяя непериодическую (случайную) вибрацию.

Спектры непериодической вибрации определяются как профили спектральной плотности ускорения (называемой также спектральной плотностью энергии), которые связывают уровни плотности энергии с определёнными полосами частот. Вибрация определяется относительно соответствующего частотного диапазона.

Использование среднеквадратических значений ускорения для описания вибрационных испытаний некорректно, поскольку среднеквадратическое значение ускорения не характеризует конкретный профиль вибрации. Одним среднеквадратическим значением ускорения можно описать бесконечное количество вариаций частотных полос и спектральных форм. Поэтому, при измерении величины и спектрального состава вибраций или при испытаниях энерго-содержание будет соотноситься с определённой полосой частот.

3.2. Условия воздействия синусоидальной вибрации

Испытание проводят путем плавного изменения частоты в заданном диапазоне от низшей к высшей и обратно. Испытания изделий с линейными резонансными характеристиками проводят путем изменения частоты в одном направлении. Значение скорости изменения частоты устанавливают равным

одной-двум октавам в минуту. Если для контроля параметров изделий требуется большее время, чем обеспечиваемое при данной скорости изменения частоты, то допускается устанавливать скорость изменения частоты менее одной октавы в минуту.

При этом скорость изменения частоты должна быть максимальной, но достаточной для обеспечения контроля необходимых параметров.

Значение скорости изменения частоты в диапазоне частот 1...50 Гц допускается устанавливать равным 10 Гц/мин. В диапазоне частот ниже частоты перехода поддерживают постоянную амплитуду перемещения, а выше частоты перехода – постоянную амплитуду ускорения.

3.3. Влияние механического импеданса

Необходимо сделать поправку, учитывающую влияние механического импеданса, поскольку преимущества от приближения условий испытаний к реальным компенсируют затраты времени, усилий и денежных средств.

Реакция конструкции оборудования скрывает собственное динамическое влияние на функцию внешнего воздействия. На резонансных частотах конструкции, когда ответные воздействия возрастают, она нагружает прилегающие опорные элементы (то есть создает провалы характеристики спектральной плотности ускорения на этих частотах). Величина влияния нагрузки определяется относительным импедансом конструкции оборудования и опорных элементов. Как известно из практики, резонирующий элемент создаёт нагружающую силу, пропорциональную его динамической массе, умноженной на соответствующий коэффициент усиления.

Влияние механического импеданса может давать свой вклад в образование спектра вибрационных испытаний. Глубина провалов определяется по результатам измерений или расчётным путём.

3.4. Ускорение воздействия вибраций

Выполнять вибрационные испытания необходимо только при наличии надёжного крепления или на замкнутых системах, чтобы учесть точные характеристики резонансных частот и условия эксплуатации.

Существует три различных типа вибрационных испытаний, каждое из которых имеет самостоятельную цель:

- Функциональные вибрационные испытания. Они предназначены для проверки работоспособности оборудования при максимальном ожидаемом уровне вибрации. Продолжительность функциональных испытаний выбирается достаточно лишь для того, чтобы удостовериться в работоспособности оборудования.

- Испытания на стойкость. Они проводятся с целью продемонстрировать, что оборудование обладает конструктивной и функциональной долговечностью, сравнимой с ТУ. Уровни и продолжительность испытаний на стойкость устанавливаются путём подъёма функциональных уровней и увеличением длительности испытания до возникновения усталостных повреждений, эквивалентных приобретаемым в течение срока службы. Это приводит к тому, что уровни вибрационных испытаний превышают максимально ожидаемые при эксплуатации, в некоторых случаях они намного выше. В испытаниях на стойкость необязательно устанавливается усталостная долговечность, поскольку они не продолжаются до разрушения оборудования. Испытания на стойкость проводятся только в течение заданного периода времени. Статистическая величина выборки достаточно мала, чтобы адекватно судить об усталостной долговечности.

- Ускоренные испытания на долговечность. В этом случае применяются повышенные функциональные уровни, как и в испытаниях на стойкость, но испытания длятся до отказа

оборудования. При этом должно использоваться несколько тестовых плат, чтобы обеспечить статистическую достоверность ускоренной усталостной долговечности.

Для масштабирования уровней вибрации, продолжительности испытаний и вывода преобразований ускорения при нагружении случайной вибрацией часто используется упрощенное соотношение для усталости. В уравнении сравниваются два режима испытаний, 1 и 2:

$$\left(\frac{СПЭ_1}{СПЭ_2} \right)^M = \frac{t_2}{t_1}, \quad (1)$$

где СПЭ – спектральная плотность энергии ($G^2/Гц$); t – время (с); M – константа материала.

Оно представляет линейную биполярную зависимость СПЭ от времени, отрицательный наклон которой равен $1/M$, если откладывать время на горизонтальной оси. Уравнение (1) может быть представлено в виде соотношения Баскина для многоциклового усталости или в виде общепризнанной кривой S/N, линейной двойной логарифмической зависимостью между напряжением и количеством циклов до наступления отказа. Значение M для паяных соединений находится в пределах от 3 до 4.

Небольшое отклонение значения показателя M может вызвать существенное изменение прогнозируемой долговечности печатного узла, если уравнение используется для пересчета при переходе от одного режима к другому. Вероятность возникновения ошибки экстраполяции особенно возрастает, если долговечность по двум режимам отличается более чем в десять раз, поэтому при проведении испытания необходимо выбрать продолжительность с учётом целесообразности работы на низких уровнях вибрации.

3.5. Испытания на механический удар

Испытания на механический удар представляют собой интенсивное

ускорение, которое имитирует жесткие условия эксплуатации. К этим условиям относятся мгновенно приложенные нагрузки или резкие изменения характера движения (например, при старте ракетносителя). Удары этой категории могут нарушить эксплуатационные характеристики или вызвать повреждение, аналогичное тому, которое возникает при чрезмерной вибрации.

Для испытаний на механический удар применяются очень быстрые и резкие циклы нагружения. Обычно ударные импульсы имеют порядок от 500г до 30000г с длительностью импульса от 0,1 до 1,0 миллисекунд. Высокая частота следования циклов позволяет проводить испытания с применением очень малых нагрузок или диапазонов смещения.

Механический удар характеризуется максимальной амплитудой, продолжительностью и ускорением, и обычно применяется к системе в виде толчка, импульса или шага. Реакция системы на удар зависит от природы удара, компоновки и материалов системы, ориентации системы относительно направления удара и резонансной частоты (или частот) системы. При небольшой длительности толчка или такта система может вибрировать на собственной резонансной частоте; амплитуда этих свободных колебаний со временем уменьшается в зависимости от демпфирующих свойств системы для диссипации механической энергии подобно тепловой.

Испытания на механический удар призваны дать количественную оценку надёжности изделия или компонента в контролируемых лабораторных условиях, что предпочтительнее испытаний в реальных условиях эксплуатации по следующим причинам:

- Временная диаграмма удара поддается контролю и может быть воспроизведена в целях сравнения; кроме того, её можно изменять в диапазоне, выделенном из широко распространённых условий эксплуатации.

- В условиях лаборатории возможна запись удара и реакции на него в реальном масштабе времени для дальнейшего анализа.

- Время и средства, затрачиваемые на проведение нескольких полевых испытаний, целесообразнее использовать для выполнения множества лабораторных испытаний.

На временную диаграмму установки для ударных испытаний может оказывать влияние масса и распределение масс печатной сборки электронного модуля, особенно если масса образца значима в сравнении с массой установки.

Вид временной диаграммы удара выбирается исходя из ожидаемого воздействия на образец испытания.

4. Определение времени испытаний

При проведении производственных испытаний электрорадиоизделий (ЭРИ) импортного производства важно определить рациональное время испытаний. Такая задача на данном этапе является нетривиальной. Будем считать, что зависимость параметров ЭРИ от времени можно описать линейной моделью следующего вида:

$$Y(t_i) = b_0 + b_1 t_i + e_{t_i}, \quad (2)$$

где β_0 , β_1 – неизвестные (неслучайные) коэффициенты; e_{t_i} – случайная величина, дисперсия которой σ^2 не зависит от времени t_i , а ковариация случайных величин e_{t_i} и e_{t_j} равна нулю при $i \neq j$.

Это можно принять, т.к. количество измеренных параметров ЭРИ в процессе испытаний невелико и, следовательно, выбор модели более высокого порядка нецелесообразен.

Оценив математические ожидания и дисперсии параметров ЭРИ, можем оценить сверху вероятность выхода значений этих параметров для надежных изделий за границы условного отказа. А именно, вероятность p того, что значение параметра Π_i для надежного ЭРИ превысит границу условного отказа,

равную y_{yo} , как следует из неравенства Чебышева, меньше или равна следующей величины:

$$P_{Pi} \leq \frac{s^2}{(y_{yo} - b_0)^2}. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность того, что надежное изделие будет в процессе испытаний классифицировано как потенциально ненадежное, пренебрежимо мала. Рассчитаем теперь длительность испытаний такую, что вероятность того, что потенциально ненадежное изделие будет классифицировано как надежное, была бы пренебрежимо малой.

Для этого необходимо, прежде всего, оценить вероятности выхода измеряемых параметров P_{Pi} потенциально ненадежного ЭРИ за границу условного отказа.

Пусть произведено n измерений параметра ЭРИ. Тогда вероятность p_z того, что z измерений превысили границу условного отказа задается биномиальным распределением:

$$p_z = C_n^z p^z (1-p)^{n-z}, \quad (4)$$

где p - вероятность выхода параметра потенциально ненадежного ЭРИ за границу условного отказа при одном измерении. Таким образом, задача оценивания вероятности выхода измеряемого параметра потенциально ненадежного ЭРИ по выборке результатов измерений в процессе испытаний есть задача оценивания параметра биномиального распределения. Как известно, оценкой, дисперсия которой равна минимальной границе дисперсии (МГД-оценкой), для параметра p биномиального распределения является

$$\hat{p} = \frac{z}{n}, \quad (5)$$

где z - число превышений границы условного отказа в выборке;
 n - объем выборки.

Дисперсия такой оценки равна

$$D = \frac{p(1-p)}{n}. \quad (6)$$

Вероятность того, что при k измерениях параметр ненадежного ЭРИ ни разу не превысит границы условного отказа оценивается величиной $(1 - \hat{p})^k$.

Пусть у нас имеется 2 критичных параметра ЭРИ: P_1 и P_2 . Тогда, при существующей длительности испытаний, вероятность отнести потенциально ненадежное ЭРИ к надежным (то есть вероятность того, что ни значение P_1 , ни значение P_2 ни разу не превысят границы условного отказа) оценивается величиной:

$$(1 - P_{P_1})^k (1 - P_{P_2})^k = a. \quad (7)$$

Если доля невыявленных потенциально ненадежных ЭРИ велика, время испытаний необходимо увеличить. Пусть доля невыявленных в процессе испытаний потенциально ненадежных транзисторов не должна превышать a_f . Количество измерений, необходимое для этого, определим как наименьшее целое k , удовлетворяющее неравенству:

$$[(1 - P_{P_1})(1 - P_{P_2})]^k \leq a, \quad (8)$$

а время испытаний t_{ucn} вычислим как

$$t_{ucn} = (k - 1)T, \quad (9)$$

где T - период времени между измерениями.

Библиографический список

1. Молин, С.М. Проблемы обеспечения динамических испытаний сложных изделий машиностроения [Текст] /С.М. Молин // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VII Всероссийской НТК. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2012. - С. 64-70.

2. Парафеев, С.Г. Методы и средства динамических испытаний конструкций летательных аппаратов: учеб. пособие [Текст] / С.Г. Парафеев, И.К. Туркин. – М.: Изд-во МНИ, 2002. – 132 с.

3. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т.5. Измерения и испытания [Текст] / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.); под ред. М.Д. Генкина. – М.: Машиностроения, 1981. – 496 с.

4. Наседкин, А.В. Методика ускоренных исследовательских испытаний паяных соединений поверхностно-монтажных электрорадиоизделий [Текст] / А.В. Наседкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 7(31). – С.153-157.

5. Федоров, В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств

[Текст]/ В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. - М.: Техносфера, 2005. – 504 с.

6. Наседкин, А.В. Технологические испытания сложных электронных модулей космической аппаратуры с SMT – монтажом [Текст] / А.В. Наседкин, М.Н. Пиганов // Самолетостроение России. Проблемы и перспективы: матер. симпоз. с междун. уч. – Самара: СГАУ, 2012. – С. 284-285.

METHOD OF PRODUCTION TESTING OF ELECTRONIC PARTS

© 2012 A. V. Nasedkin, S. V. Tyulevin, M. N. Piganov

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

An algorithm for production tests of electronic components is proposed. The features of dynamic tests are considered. Test exposures are selected. The time of the test for the linear model parameter changes electrical radio products was determined.

Production tests, algorithm, test impact, linear model, test time.

Информация об авторах

Наседкин Алексей Васильевич, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: испытания электронных узлов космической аппаратуры.

Тюлевин Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipres@ssau.ru. Область научных интересов: надёжность и качество космических радиоэлектронных средств.

Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: piganov@ssau.ru. Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

Nasedkin Aleksey Vasilyevich, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: testing electronic components of spacecraft.

Tyulevin Sergei Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: kipres@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of space-based radioelectronic means.

Piganov Mikhail Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of design and production radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: piganov@ssau.ru. Area of scientific: quality and reliability of radio-electronic equipment.