

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ

М. Л. Савин¹, В. Д. Зуев², И. И. Кочегаров³, Е. М. Соловьева⁴, А. В. Лысенко⁵

¹ Мытищинский научно-исследовательский институт
радиоизмерительных приборов, Мытищи, Московская обл., Россия
² Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
^{3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ savin@mniirip.ru, ² vdzuev@yandex.ru, ^{3,4} kipra@mail.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Около 90 % отказов электроники происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Данные причины отказов этих типов компонентов легко анализируются. Рассматриваются наименее надежные по статистике элементы – силовые транзисторы и электролитические конденсаторы. Проводится анализ влияющих факторов и предлагается методика, направленная на определение работоспособного состояния устройства. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач применяются методы системного анализа, теории надежности, материаловедения. *Результаты.* Рассмотрены современные подходы для контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам электронных устройств. Отмечены недостатки используемых подходов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам, относящимся к силовым транзисторам и электролитическим конденсаторам для электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации. *Выводы.* На основе предложенной методики целесообразно создать систему регистрации внешних воздействий, позволяющую в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

Ключевые слова: отказ, надежность, температура, вибрация, ресурс, модель

Финансирование. Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Повышение точности интеллектуального прогнозирования надежности электронной аппаратуры и техники при критических внешних воздействующих факторов» (Соглашение № 22-29-20318) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Для цитирования: Савин М. Л., Зуев В. Д., Кочегаров И. И., Соловьева Е. М., Лысенко А. В. Методика контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 98–107. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-11

METHODS OF PERFORMANCE MONITORING DEVICES BY INDIRECT PARAMETERS

M.L. Savin¹, V.D. Zuev², I.I. Kochegarov³, E.M. Solov'eva⁴, A.V. Lysenko⁵

¹ Mytishchi Research Institute of Radio Measuring Instruments
² Scientific and Research Institute of Electronic and Mechanic Instruments, Penza, Russia
^{3,4,5} Penza State University, Penza, Russia
¹ savin@mniirip.ru, ² vdzuev@yandex.ru, ^{3,4} kipra@mail.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Abstract. *Background.* According to electronics failure analysis, 90 % of failures occur in a very limited number of failed component types. Possible causes of failures of these types of components are easy to analyze. The paper considers the least statistically reliable elements – power transistors and electrolytic capacitors. The analysis of influencing factors is carried out and a technique is proposed aimed at determining the operable state of the device. *Materials and methods.* To solve the tasks set, methods of system analysis, reliability theory, and materials science are used. *Results.* The article discusses modern approaches to monitoring the performance of a device by indirect parameters of electronic devices. The shortcomings of the approaches used are noted. An analysis of the impact of factors on the service life of the device was carried out, on the basis of which a methodology was developed for assessing the control of the device's performance by indirect parameters related to power transistors and electrolytic capacitors for the electronic unit based on a mathematical model that takes into account operating conditions. *Conclusions.* Based on the proposed methodology, it is advisable to create a system for registering external influences, which allows real-time

monitoring of operating conditions and, taking them into account, predicting the residual life of the electronic unit.

Keywords: failure, reliability, temperature, vibration, resource, model

Acknowledgments. The article was prepared within the framework of the project "Improving the accuracy of intelligent forecasting of the reliability of electronic equipment and equipment under critical external influencing factors" (Agreement No. 22-29-20318) with the financial support of the Russian Science Foundation.

For citation: Savin M.L., Zuev V.D., Kochegarov I.I., Solov'eva E.M., Lysenko A.V. Methods of performance monitoring devices by indirect parameters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):98–107. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-11

Введение

Согласно докладу центра перспективной инженерии жизненного цикла (CALCE), в 30 % случаев отказа электронного устройства виновником отказа являются конденсаторы, в 26 % – печатные платы, в 21 % – полупроводники в пластиковых корпусах и в 13 % – пайка [1]. Наглядное представление долей отказов изображено на рис. 1.

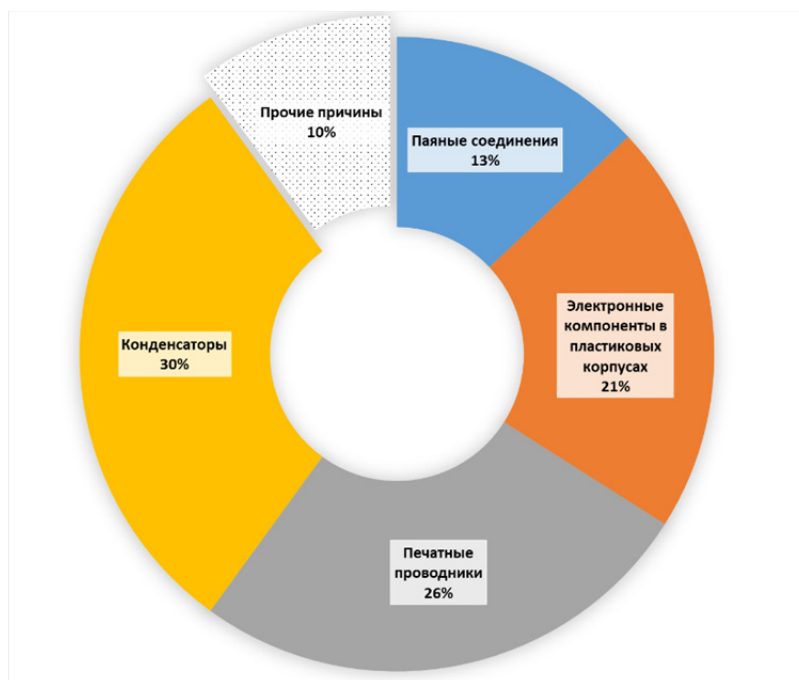


Рис. 1. Доля отказов различных групп компонентов

В исследовании [2] рассматриваются отказы силовых преобразователей с целью более точного отслеживания технического состояния устройства. Распределение отказов по компонентам очень схоже с ранее упомянутым на рис. 1.

Таким образом, 90 % отказов происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Возможные причины отказов этих типов компонентов легко поддаются анализу.

Описание методики

Цель представленной в данной работе методики – определить, находится ли устройство в работоспособном состоянии и не достигло ли оно предельного состояния, когда отказ может произойти в ближайшее время. Необходимо также отметить, что целью данной методики не является определение причины отказа. Для этого существуют специализированные отрасли науки и техники, такие как физика отказов (Physics-of-Failure, PoF) и разработка для надежности (Design-for-Reliability, DfR).

Как было сказано выше, существующие методики позволяют на этапе разработки определить примерный срок службы устройства, однако точность этого расчета оставляет желать лучшего. В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению влияния деградации и старения на надеж-

ность устройства, в результате чего интенсивность отказов уже нельзя считать постоянной на протяжении всего срока службы (рис. 2) [3, 4].

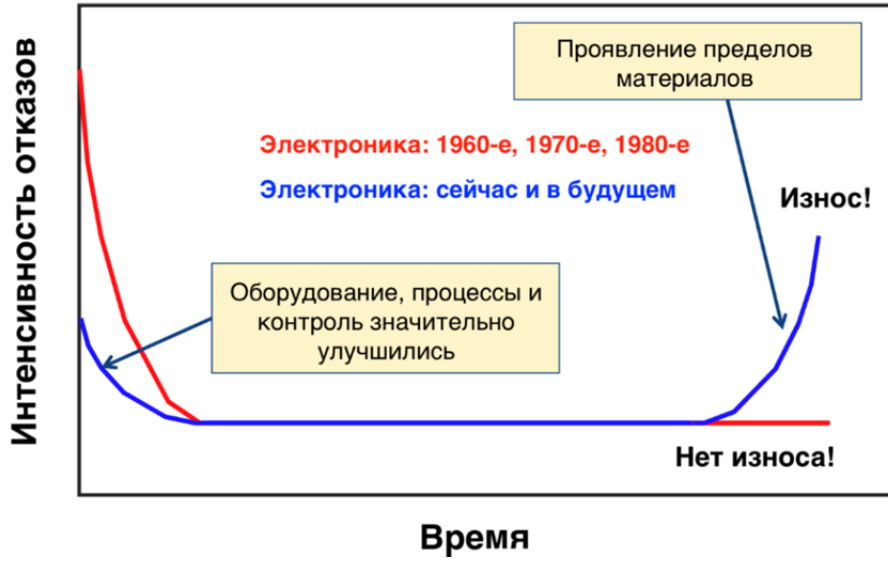


Рис. 2. Интенсивность отказов сейчас и в прошлом

Таким образом, для точного определения работоспособности изделия необходимо оценивать его состояние в настоящий момент времени. Очевидно, что напрямую контролировать параметры каждого электронного компонента в современном устройстве не представляется возможным из-за огромного числа этих компонентов и сложности прямого контроля параметров. Как показывает ряд работ, 77 % всех отказов приходится на дефекты печатных плат, отказы конденсаторов и полупроводниковых компонентов (рис. 3) [5, 6]. Таким образом, большую часть отказов можно предсказать, оценивая состояние этих групп компонентов.

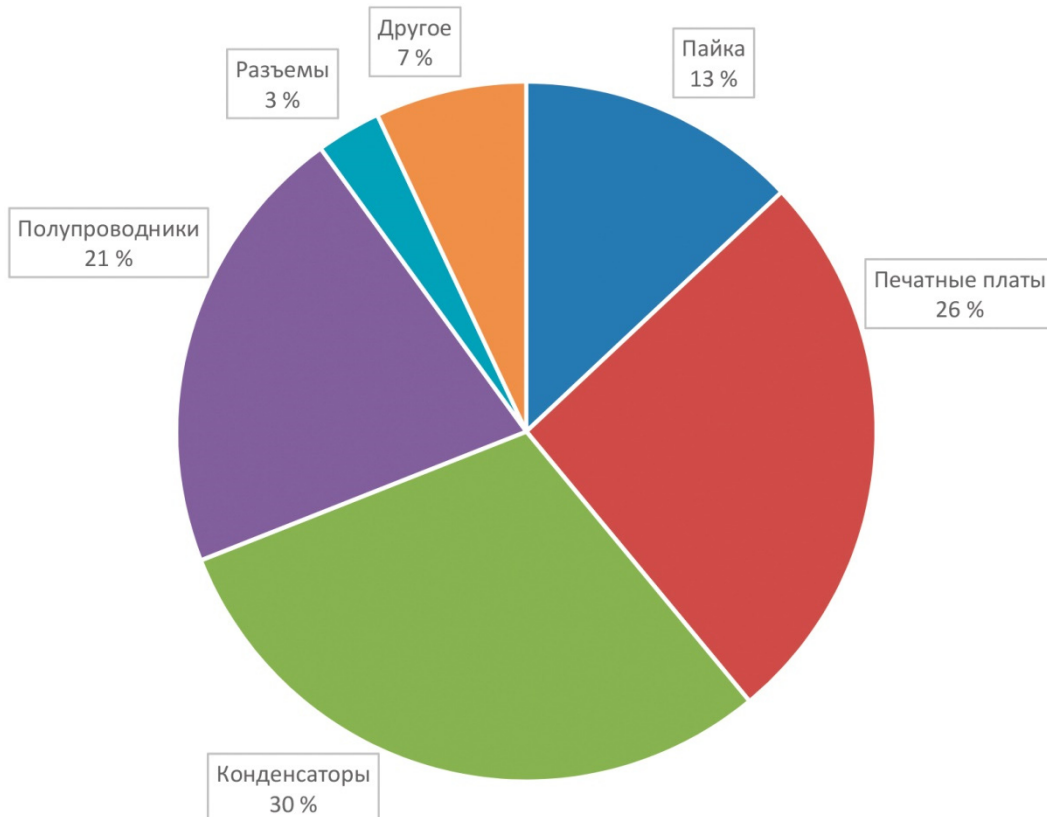


Рис. 3. Доля отказов различных групп компонентов

Рассмотрим основные типы компонентов, наиболее подверженных отказу, возможные виды отказов и их причины. Также отметим характер возникновения отказа – постепенный (деградация) или внезапный (табл. 1) [7–11].

Таблица 1

Анализ возможных отказов компонентов

Тип компонента	Вид отказа	Причина	Хар. отк.
Печатная плата (PCB)	Короткое замыкание	– Дефекты производства – Возникновение проводящих нитей	В
	Увеличение тока утечки	– Недостаточная очистка при производстве – Окисление	П
	Обрыв	– Вибрация – Дефекты производства	В
Конденсатор	Короткое замыкание	– Электрический пробой – Вибрация (керамические конденсаторы)	В
	Обрыв	– Вибрация	В
	Увеличение тока утечки	– Микротрещины (керамические конденсаторы) – Деградация оксидного слоя (электролитические конденсаторы) – Тепловое воздействие	П
	Старение: уменьшение емкости, увеличение эквивалентного последовательного сопротивления	– Тепловое воздействие – Деградация изолятора	П
Полупроводниковые компоненты	Короткое замыкание	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Электромиграция – Тепловое воздействие	В
	Обрыв	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Вибрация – Тепловое воздействие	В
	Увеличение сопротивления перехода	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Тепловое воздействие	П
	Увеличение тока утечки	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Тепловое воздействие	П

Примечание: В – внезапный отказ, П – постепенный отказ.

Внезапные отказы происходят, как правило, вследствие неожиданных внешних воздействий, что делает невозможным их предсказание.

Выявление дефектов печатной платы в работающем устройстве также затруднено, так как эти дефекты либо проявляются внезапно, либо недоступны для измерения в работающем устройстве. Влияние вибрации сильно связано с геометрическими параметрами печатной платы с компонентами, а также особенностями технологии. Эти факторы делают невозможным создание обобщенной модели работоспособности печатной платы. К тому же большая часть дефектов платы проявляется в начальный период эксплуатации [12].

Контроль работоспособности сложных цифровых микросхем, таких как ПЛИС и микроконтроллеры, реализуется программными методами проверки и мажоритарным резервированием [13]. Данный вопрос также решается теорией функциональной безопасности и соответствующими стандартами.

Применение смарт-компонентов, о которых было сказано выше, позволяет решить целый ряд проблем мониторинга отказов и защиты.

Таким образом, с учетом сказанного выше контроль работоспособности необходим для двух групп компонентов, а также функциональных блоков на их основе [9]:

– конденсаторы, в особенности электролитические, как наиболее подверженные процессу деградации при эксплуатации [12, 14];

– дискретные полупроводниковые компоненты, для которых нет аналогов с возможностью диагностики и мониторинга.

Как видно из табл. 1, тепловое воздействие служит причиной для большинства видов отказов. Следовательно, именно наиболее теплонагруженные компоненты подвержены частым отказам.

В современной электронике наиболее теплонагруженным функциональным блоком как правило является источник питания. Более того, его надежность и отказоустойчивость являются определяющим фактором для надежности всего устройства в целом. Низкая надежность этого блока относительно остальной части устройства зачастую приводит к необходимости резервирования (дублирования) источника питания, что увеличивает стоимость и геометрические размеры конечного устройства.

Для уменьшения размера современные источники питания наиболее часто являются импульсными. Такой тип источников включает в себя полупроводниковые компоненты (транзисторы и диоды), работающие в условиях повышенных температур, и конденсаторы, как правило электролитические, которые также подвержены заметному процессу деградации [9].

Сформулируем основные шаги методики, необходимые для контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам:

- 1) выявляем наименее надежные компоненты (на этапе разработки);
- 2) определяем параметры компонентов, позволяющие контролировать степень их деградации;
- 3) определяем подходящие для контроля параметры системы, математически связываем их с параметрами компонентов из пункта 2;
- 4) разрабатываем схемы контроля параметров системы;
- 5) встраиваем их в основную схему;
- 6) определяем граничные значения, определяющие диапазоны нормальной работы, предельного состояния и неработоспособного состояния.

Как было сказано выше, наименее надежными элементами являются силовые транзисторы и электролитические конденсаторы. Рассмотрим, как проявляются процессы деградации их параметров.

Анализ влияющих факторов – повышенная температура

Рассмотренные выше (табл. 1) отказы, которые провоцируются повышенной температурой, являются в своем роде макропроявлениями процессов, проходящих на молекулярном уровне. Поэтому известные зависимости, характеризующие процессы, происходящие на молекулярном уровне, будут справедливы и в отношении оценки остаточного ресурса электроники.

Именно такой подход принят стандартами JEDEC для оценки результатов, полученных при проведении ускоренных испытаний на надежность (Highly accelerated stress test), проводимых по стандарту JESD22-A118 [6].

Ускоренные испытания по стандарту JESD22-A118 представляют собой 96-часовые испытания в герметичной камере, в которой поддерживается постоянная температура воздуха 130 ± 2 °C и влажность воздуха 85 ± 5 %.

Для интерпретации результатов ускоренных испытаний в показатели надежности устройства вводится понятие ускоряющего фактора (AF) – величина, численно равная отношению интенсивности отказов при условиях испытания к интенсивности отказов при рабочих условиях.

Изначально было экспериментально подтверждено, что влияние температуры на процессы старения подчиняется уравнению Аррениуса [7]. Уравнение Аррениуса связывает скорость протекания химической реакции с родом этой реакции и абсолютной температурой. Уравнение приведено в формуле

$$K = Ae^{-\frac{E_0}{kT}}, \quad (1)$$

где K – константа скорости химической реакции; A – частота столкновений реагирующих молекул; E_0 – энергия активации, необходимая для прохождения химической реакции; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана.

Так как при переводе результатов ускоренных испытаний в показатели надежности устройства инженера интересует относительное влияние температуры, то множитель A легко сокращается, тем более, что он не имеет смысла применительно к надежности электронных средств.

Энергия активации E_0 характеризует род химической реакции. В случае с процессами старения электроники энергия активации – эмпирическое значение необходимое для инициации отказа. В каждом конкретном случае (электромиграция, окисление пайки, высыхание электролита и т.д.) необходимая энергия различна. Однако на основании эмпирических данных значение энергии активации для электроники в целом принимается равным 0,6...0,8 эВ [8].

Таким образом, ускоряющий фактор можно рассчитать по формуле

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (2)$$

где AF_T – ускоряющий фактор, связанный с температурой; E_a – энергия активации равная 0,6...0,8 эВ; $T_{н.у.}$ – абсолютная температура, для которой рассчитана интенсивность отказов; $T_{эксп.}$ – абсолютная температура эксплуатации; k – постоянная Больцмана.

Будем использовать E_a равной 0,7 эВ. Тогда уравнение (2) можно записать в более практичном виде

$$AF_T = e^{8116 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (3)$$

где AF_T – ускоряющий фактор, связанный с температурой; $T_{эксп.}$ – абсолютная температура эксплуатации.

Анализ влияющих факторов – повышенная влажность

Процессы деградации, усугубляющиеся присутствием влажности, также в обязательном порядке зависят от температуры. Установленная зависимость процессов старения от уровня влажности по своему виду очень похожа на уравнение Аррениуса, однако имеется дополнительный множитель, учитывающий относительную влажность [9, 10]. Ускоряющий фактор для процессов старения, связанных с влажностью, описывается по формуле

$$AF_H = (RH)^3 e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (4)$$

где AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; E_a – энергия активации; RH – относительная влажность; $T_{эксп.}$ – абсолютная температура эксплуатации; k – постоянная Больцмана.

Заметим, что при уровне относительной влажности в 0 % значение ускоряющего фактора обращается в ноль, что согласуется с физической природой процессов. Для описания процессов старения, связанных с влажностью, принято соотношение $\frac{E_a}{k}$ равным 5235 и перепишем уравнение (4) в более практичном виде

$$AF_H = (RH)^3 e^{5235 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (5)$$

где AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; RH – относительная влажность; $T_{эксп.}$ – абсолютная температура эксплуатации.

Анализ влияющих факторов – изменение температуры

В течение эксплуатации электронная техника испытывает изменения температуры, вызванные естественными суточными перепадами температуры воздуха, собственным нагревом или другими причинами. Резкие большие перепады температуры являются серьезной нагрузкой для электроники из-за применения материалов с различными температурными коэффициентами расширения.

Для подтверждения устойчивости изделия к перепадам температур проводят испытания на термоциклирование. Изделие помещают в специализированное оборудование – камеру термоциклирования либо в двухсекционную камеру, где подвергают перепадам температуры еще более жестким, чем те, с которыми устройство может столкнуться в процессе эксплуатации.

Испытания на термоциклирование являются одним из наиболее жестких, так как позволяют выявить скрытые дефекты конструкции и технологий, скрытые дефекты изделий электронной техники и т.д. Искусственно созданные жесткие перепады температуры позволяют проводить ускоренные испытания, однако результаты таких испытаний сложно интерпретировать.

Для соотнесения лабораторных условий с реальными используется модель Норриса – Ландзберга [11] для усталостного разрушения паяных соединений. Эту же модель в этой работе будем использовать для определения ускоряющего фактора, связанного с изменением температуры.

Ускоряющий фактор, связанный с циклическим изменением температуры, описывается по формуле

$$AF_{TC} = \left(\frac{f_{\text{эксп.}}}{f_{\text{н.у.}}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{\text{эксп.}}}{\Delta T_{\text{н.у.}}} \right)^{1,9} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{н.у.}}^{\text{MAX}}} - \frac{1}{T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}} \right)}, \quad (6)$$

где AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; $f_{\text{н.у.}}$ – частота изменения температуры в нормальных условиях; $f_{\text{эксп.}}$ – частота изменения температуры в условиях эксплуатации; $T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}$ – максимальная абсолютная температура эксплуатации; $T_{\text{н.у.}}^{\text{MAX}}$ – максимальная абсолютная температура в нормальных условиях; $\Delta T_{\text{эксп.}}$ – перепад температуры в условиях эксплуатации; $\Delta T_{\text{н.у.}}$ – перепад температуры в нормальных условиях; E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана.

Для процессов, связанных с термоциклированием, принято брать соотношение $\frac{E_a}{k}$ равным 1414. Характеристики максимальной температуры и амплитуды перепада для нормальных условий будем основывать на среднесуточном перепаде температуры в городе Москва в июле месяце (самом жарком). Средний максимум составляет 24,3 °С, средний минимум – 14,4 °С [12]. Для удобства счета примем $\Delta T_{\text{н.у.}} = 10$ °С; $T_{\text{н.у.}}^{\text{MAX}} = 25$ °С. А частота изменения температуры в таком случае $f_{\text{н.у.}} = 1/\text{день}$. С учетом вышесказанного перепишем уравнение (6) в более удобном виде

$$AF_{TC} = f_{\text{эксп.}}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{\text{эксп.}}}{10} \right)^{1,9} e^{1414 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}} \right)}, \quad (7)$$

где AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; $f_{\text{эксп.}}$ – частота изменения температуры в при эксплуатации, день^{-1} ; $T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}$ – максимальная абсолютная температура эксплуатации; $\Delta T_{\text{эксп.}}$ – перепад температуры в условиях эксплуатации °С.

Циклическая механическая нагрузка

Усталостные разрушения вызываются циклическими нагрузками, по своей силе заметно уступающими пределу прочности материала. Такими нагрузками являются вибрации, испытываемые электронным оборудованием в процессе эксплуатации. Некоторые материалы, такие как сталь, обладают пределом выносливости, т.е. могут выдерживать циклические нагрузки с напряжениями меньше предела выносливости неограниченное количество циклов. Медь к таким материалам не относится и неизбежно разрушится даже под действием очень маленькой нагрузки. Количество циклов до разрушения зависит от амплитуды напряжений, возникающих в материале, и от рода материала. Эту зависимость принято изображать на так называемой диаграмме Веллера. Для холоднокатаной медной фольги диаграмма Веллера изображена на рис. 4.

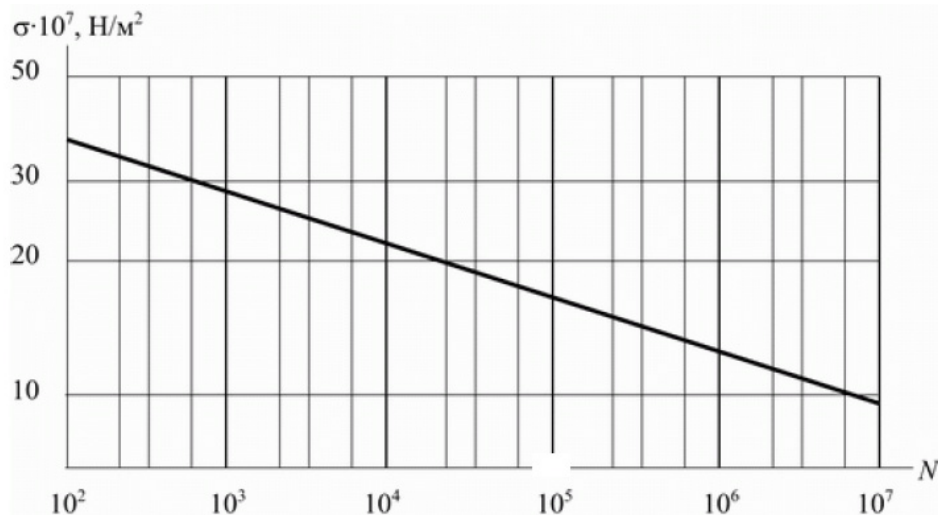


Рис. 4. Кривая усталости для холоднокатаной медной фольги

Ускоряющий фактор для циклической механической нагрузки должен быть также основан на количестве циклов и вызываемом напряжении.

Поскольку ускоряющий фактор описывает текущие условия эксплуатации и изменяется во времени, то он не может определяться через количество циклов нагружения. Вместо этого характеризующая величина, отражающая количество циклов нагружения – частота испытываемой нагрузки.

Общий подход к прогнозированию усталостных разрушений основывается на применении обратного степенного закона, общий вид которого описывается формулой

$$L(V) = \frac{1}{KV^n}, \quad (8)$$

где $L(V)$ – количественная мера выносливости; V – количественная мера нагрузки; n, K – параметры модели.

В случае с усталостными механическими нагрузками количественной мерой выносливости является количество циклов до разрушения N , а количественной мерой нагрузки – возникающие напряжения σ .

Диаграммы Веллера получают эмпирическим путем и хорошо изучены только для самых востребованных конструкционных материалов, таких как стали и сплавы на основе алюминия. Одной из проблем в описании механических усталостных разрушений в радиоэлектронике является плохая изученность свойств материалов.

Дополнительным препятствием является то, что паяные соединения могут сильно отличаться от изделия к изделию. Этому способствуют несколько причин: использование различных по химическому составу припоев или паяльных паст, разные объемы использования припоя в силу использования контактных площадок разных размеров и разной толщины трафарета для паяльных паст. Все это делает затруднительным нахождение четкой аналитической зависимости.

Свяжем количество циклов до разрушения N и возникающие напряжения σ с измеряемыми величинами и выразим ускоряющий фактор для циклической механической нагрузки.

Согласно закону Гука, возникающая сила упругости, а значит, и механические повреждения пропорциональны деформации, т.е. перемещению Δx . А быстрота прироста количества совершенных циклов нагружения пропорциональна частоте f . Учитывая вышесказанное, а также зависимость (8), ускоряющий фактор должен иметь вид

$$AF_V = K \left(\frac{a}{(2\pi f)^2} \right)^n f, \quad (9)$$

где AF_V – ускоряющий фактор для циклической механической нагрузки (вибрации); a – амплитуда ускорения, испытываемого электронным компонентом, платой и т.п.; f – частота вибрации (циклической механической нагрузки); n, K – параметры модели.

Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены современные подходы, применяемые для контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам электронных устройств. Отмечены недостатки используемых подходов.

Проведенный анализ статистического распределения отказов по компонентам и причин отказов электронных устройств и электронных компонентов позволил продемонстрировать значимость внешних воздействующих факторов в процессах отказов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации.

На основе предложенной методики целесообразно создать систему регистрации внешних воздействий, позволяющую в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

Предложенная методика имеет практическую значимость в таких применениях электроники, отказ которых может приводить к причинению вреда здоровью человека, а также издержкам, многократно превышающим затраты на своевременное техническое обслуживание или замену.

Список литературы

1. FMEA // Википедия. 2018.
2. Failure modes, effects, and diagnostic analysis // Wikipedia. 2019.
3. Matt Sunna. Protector, monitor or gauge – selecting the correct battery electronics for your Li-ion-powered system – Power management – Technical articles – TI E2E support forums. 2019.
4. Pinheiro E., Weber W.-D., Barroso L.A. Failure Trends in a Large Disk Drive Population // 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007). 2007. P. 17–29.
5. Willems G., Vandeveldel B. Physics-of-failure based reliability-by-design. IMEC-CEDM, 2015.
6. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review // IEEE Trans. Power Electron. 2010. Vol. 25, № 11. P. 2734–2752.
7. Sood B. Root-Cause Failure Analysis of Electronics. SMTA Philadelphia, 2013.
8. Failure of electronic components // Википедия. 2020.
9. Wang H. [et al.]. Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics // Emerg. Sel. Top. Power Electron. IEEE J. Of. 2014. Vol. 2. P. 97–114.
10. Wu Lifeng et al. Research on failure analysis method of the key components in SMPS // 2011 Prognostics and System Health Management Confernece. 2011. P. 1–6.
11. Thaduri A. [et al.]. Reliability prediction of semiconductor devices using modified physics of failure approach // Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag. 2013. Vol. 4, № 1. P. 33–47.
12. Gu J. [et al.]. Prognostics Implementation Methods for Electronics. 2007. P. 101–106.
13. Sinapis K., Folkerts W. MLPM Benchmark Report. SEAC, 2013. P. 66.
14. Salewski F., Taylor A. Fault Handling in FPGAs and Microcontrollers in Safety-Critical Embedded Applications: A Comparative Survey // 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007). 2007. P. 124–131.

References

1. FMEA. *Wikipedia*. 2018.
2. Failure modes, effects, and diagnostic analysis. *Wikipedia*. 2019.
3. Matt Sunna. *Protector, monitor or gauge – selecting the correct battery electronics for your Li-ion-powered system – Power management – Technical articles – TI E2E support forums*. 2019.
4. Pinheiro E., Weber W.-D., Barroso L.A. Failure Trends in a Large Disk Drive Population. *5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007)*. 2007:17–29.
5. Willems G., Vandeveldel B. *Physics-of-failure based reliability-by-design*. IMEC-CEDM, 2015.
6. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010;25(11):2734–2752.
7. Sood B. *Root-Cause Failure Analysis of Electronics*. SMTA Philadelphia, 2013.
8. Failure of electronic components. *Wikipedia*. 2020.
9. Wang H. [et al.]. Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics. *Emerg. Sel. Top. Power Electron. IEEE J. Of.* 2014;2:97–114.
10. Wu Lifeng et al. Research on failure analysis method of the key components in SMPS. *2011 Prognostics and System Health Management Confernece*. 2011:1–6.

11. Thaduri A. [et al.]. Reliability prediction of semiconductor devices using modified physics of failure approach. *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.* 2013;4(1):33–47.
12. Gu J. [et al.]. *Prognostics Implementation Methods for Electronics*. 2007:101–106.
13. Sinapis K., Folkerts W. *MLPM Benchmark Report*. SEAC, 2013:66.
14. Salewski F., Taylor A. Fault Handling in FPGAs and Microcontrollers in Safety-Critical Embedded Applications: A Comparative Survey. *10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007)*. 2007:124–131.

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Леонидович Савин

и. о. директора,
Мытищинский научно-исследовательский институт
радиоизмерительных приборов
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,
ул. Колпакова, 2А)
E-mail: savin@mniirip.ru

Вячеслав Дмитриевич Зуев

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: vdzuev@yandex.ru

Игорь Иванович Кочегаров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Елена Михайловна Соловьева

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Maksim L. Savin

Acting director,
Mytishchi Research Institute of Radio Measuring
Instruments
(2A Kolpakova street, Mytishchi,
Moscow region, Russia)

Vyacheslav D. Zuev

Candidate of technical sciences, general director,
Scientific and Research Institute
of Electronic and Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Igor I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Elena M. Solovieva

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Alexey V. Lysenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.09. 2021

Поступила после рецензирования / Revised 10.10.2021

Принята к публикации / Accepted 10.11.2021