

И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, О. К. Абdirашев, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, O. K. Abdirashev, D. S. Ergaliev, A. D. Tulegulov

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE RESIDUAL LIFE OF THE ELECTRONIC UNIT WITH THE USE OF ACCELERATING FACTORS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Ставится цель – оценить остаточный ресурс изделия для электронного блока. Рассматриваются виды отказов в электронных средствах. Актуальность подобного подхода вызвана экономической целесообразностью, когда невозможна оперативная замена блока. Определение остаточного срока службы является важной концепцией в принятии решений по снижению рисков и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций. Ставится задача оценки остаточного ресурса за счет введения ускоряющих коэффициентов при проведении испытаний для различных видов воздействий. Подробно рассматривается влияние дефектов конденсаторов на остаточный ресурс. *Материалы и методы.* Для предварительной оценки режимов работы электронных схем предложена математическая модель, позволяющая учесть влияние ускоряющих факторов в зависимости от вибраций, температуры и влажности, а также оценить надежность изделия. Для получения зависимости режима работы конденсатора от температуры применяются методы статистической обработки данных, полученных в ходе измерений. *Результаты.* Предложенная методика позволяет учесть температуру в дополнительном коэффициенте, влияющем на расчет надежности. Коэффициент может применяться как в оценочных расчетах на этапе проектирования, так и при эксплуатации изделия на основе данных, получаемых в реальном времени. Данная методика базируется на известных физических моделях и позволяет добиться хорошего совпадения с экспериментальными данными за счет введения весовых коэффициентов. *Выводы.* Предложенная методика позволяет на основе предварительно подготовленных данных оценивать остаточный ресурс блока в зависимости от интегрального изменения таких воздействующих факторов, как вибрация, температура, влажность.

Ключевые слова: остаточный ресурс, надежность, температура, конденсатор, отказы, моделирование.

Abstract. *Background.* The article aims to assess the residual life of the product for the electronic unit. The types of failures in electronic means are considered. The relevance of this approach is due to the economic feasibility, when it is impossible to quickly replace the unit. Determining the remaining service life is an important concept in making decisions to reduce risks and mitigate the consequences of emergencies. The task is to assess the residual life by introducing accelerating factors during testing for various types of impacts. The influence of defects of capacitors on the residual life is considered in detail. *Materials and methods.* For a preliminary assessment of the operating modes of electronic circuits, a mathematical model is proposed that allows taking into account the influence of accelerating factors depending on vibrations, temperature and humidity, as well as assessing the reliability of the product. To obtain the dependence of the operating mode of the condenser on temperature, methods of statistical processing of the data obtained during measurements are used. *Results.* The proposed technique makes it possible to take into account the temperature in an additional coefficient that affects the calculation of reliability. The coefficient can be used both in estimated calculations at the design stage and during the operation of a product based on data obtained in real time. This technique is based on known physical models and allows you to achieve good agreement with experimental data by introducing weighting factors. *Conclusions.* The proposed technique allows, on the basis of previously prepared data, to evaluate the residual resource of the unit depending on the integral change in such influencing factors as vibration, temperature, and humidity.

Keywords: residual life, reliability, temperature, capacitor, failures, modeling.

Введение

Развитие технологий и сегодняшняя тенденция в проектировании микроэлектроники сделали возможным применение все более возрастающих по сложности электронных схем в ответственных применениях с высоким требуемым уровнем надежности. Для таких применений фундаментально важным является наличие средств самодиагностики, позволяющих убедиться в отсутствии либо наличии повышенного риска отказа системы и тем самым распознать приближающийся отказ [1].

Перспективным развитием средств самодиагностики является возможность предсказания срока службы конкретного технического устройства, на основе оценки его остаточного ресурса в конкретный момент времени с учетом характера его эксплуатации. Развитие технологических возможностей производства как электронных компонентов, так и электронных устройств привело к ситуации, когда интенсивность случайных отказов, отказов, связанных с приработкой, снизилась, а интенсивность отказов, связанных с износом, увеличилась [2, 3].

Актуальность прогнозирования остаточного ресурса подпитывается экономической целесообразностью проведения технического обслуживания (либо превентивной замены компонентов), основанного на ключевом параметре – остаточном ресурсе, в отличие от косвенных показателей, таких как наработка (моточасы), пробег, рабочие циклы, срок службы (календарный) и т.п. Определение остаточного срока службы является важной концепцией в принятии решений по снижению рисков и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций.

Данная работа посвящена разработке методики оценки остаточного ресурса электронного блока.

1. Анализ существующих подходов к прогнозированию

В последнее время уделяется особое внимание оперативному прогнозированию остаточного ресурса для сложных изделий и систем с различными видами режимов отказов с целью мониторинга надежности в реальном времени и максимизации экономии.

Прогнозирование основано на анализе режимов разрушения, выявлении ранних признаков износа и старения, а также аварийных состояний. Эффективное прогностическое решение реализуется при наличии достоверных знаний о механизмах сбоев, которые могут привести к деградации, ведущей к возможным сбоям в системе.

Кроме того, накоплен массив данных о различных отказах компонентов и устройств, что делает перспективными статистические подходы к решению задачи оценки остаточного ресурса.

Существуют научные дисциплины под общим названием «управление здоровьем», которые связывают изучение механизмов отказа и управление жизненным циклом системы, включая техническое обслуживание на основе состояния объекта. В рамках этих научных дисциплин развились различные подходы к прогнозам технического состояния объекта.

1.1. Прогнозирование на основе данных

Прогнозирование на основе данных обычно использует методы распознавания образов и машинного обучения для обнаружения изменений в состояниях системы [4]. С математической точки зрения задача сводится к прогнозированию нелинейных систем. Классические методы прогнозирования нелинейных систем включают использование стохастических моделей, а в последние годы внимание направлено на более гибкие решения, такие как нейронные сети.

В общем случае, подходы, основанные на использовании данных, уместны в тех случаях, когда понимание первых принципов функционирования системы не является всеобъемлющим или когда система является достаточно сложной, так что разработка точной модели является непомерно дорогостоящей. Из этого вытекают их главные недостатки и достоинства: требуют большого массива данных для обучения, имеют повышенную вероятность ошибочных предсказаний, не привязаны к узким физическим моделям. Значительным препятствием является необходимость получения данных до отказа, что может быть затруднительно, особенно в приложениях с высокой необходимой надежностью. Кроме того, характер использования устройства может отличаться от режимов, при которых собирались данные, а сбор данных, который включает все возможные будущие использования (как нагрузка, так и условия окружающей среды), часто становится почти невозможным. По-

мимо большого количества данных, в смысле количества обработанных циклов отработки до отказа, модель может оказаться требовательна к качеству данных, так как заранее неизвестно, какие параметры системы необходимо отслеживать. Предпочтительно отслеживать как можно большее количество параметров (эти источники данных могут включать температуру, давление, нефтяные частицы, токи, напряжения, мощность, вибрацию и акустический сигнал, а также иные специфические параметры, такие как радиация и т.д.).

1.2. Прогнозирование на основе моделей

Подход на основе моделей пытается включить физическое понимание происходящего в оценку остаточного ресурса, т.е. задействует физические модели для предсказания технического состояния объекта.

Физические модели различают по подробности рассмотрения физических процессов. На микроуровне физические модели воплощаются в серии динамических уравнений, которые определяют отношения, в данный момент времени или цикла нагрузки, между повреждением (или деградацией) системы/компонента и экологическими и эксплуатационными условиями, в которых система/компонент эксплуатируются. В качестве примера таких моделей могут служить модель усталостной долговечности В. Харриса для шарикоподшипников, которая связывает усталостную долговечность подшипника с индуцированным напряжением, или модель роста трещин Париса и Эрдогана.

Макроуровневая модель – это математическая модель на системном уровне, которая определяет взаимосвязь между входными переменными системы, переменными состояния системы и переменными/выходными измерениями системы, где модель часто является несколько упрощенным представлением системы. При этом неизбежен компромисс между точностью модели, шириной охвата и трудоемкостью модели.

1.3. Гибридные подходы

Гибридные подходы пытаются использовать преимущества как подходов, основанных на данных, так и подходов, основанных на моделях. В действительности редко бывает так, что применяемые на практике методы полностью основаны либо на данных, либо на моделях. Как правило, подходы, основанные на моделях, включают в себя некоторые аспекты подходов, основанных на данных, и подходы, основанные на данных, собирают имеющуюся информацию из моделей. Примером может служить настройка параметров модели с использованием полученных в ходе эксплуатации данных.

В работе [5] рассматривают два вида отказов:

– «Мягкие отказы» (*Soft failures*), которые включают в себя деградационные отказы, обусловленные естественными постепенными процессами старения, и уроном, вызванным внешними воздействиями;

– «Жесткие отказы» (*Hard failures*), которые включают в себя внезапные отказы, обусловленные внешними воздействиями.

Для мягких отказов вводится математическое описание состояния системы:

$$X_k = X_{k-1} + \beta \Delta t + Y_k, \quad (1)$$

где X – состояние системы; k – итерация обновления значения; β – скорость деградации; Δt – промежуток времени между итерациями; Y_k – суммарный урон, полученный системой.

В качестве примера применения такой модели следует отметить диагностику аккумуляторов, так как процессы, происходящие в ячейке при старении, достаточно хорошо изучены и однообразны, что позволяет на основании изменения вышеуказанных параметров давать оценку здоровью (ресурсу) аккумулятора.

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 [6]. Наглядное представление долей отказов изображено на рис. 1.



Рис. 1. Доля отказов различных групп компонентов

В исследовании [7] рассматриваются отказы силовых преобразователей с целью более точного отслеживания технического состояния устройства. Распределение отказов по компонентам очень схоже с ранее упомянутым и представлено на рис. 2.

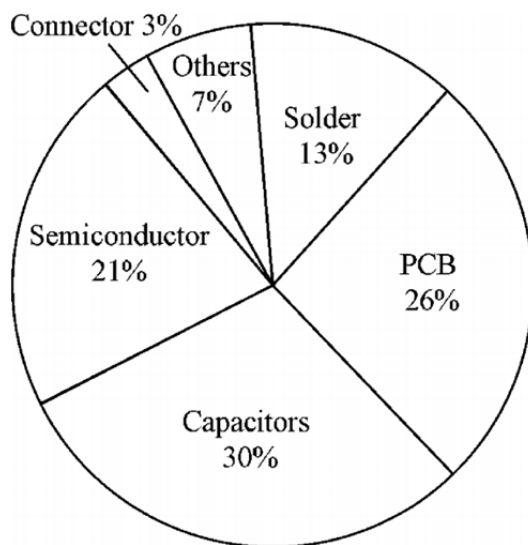


Рис. 2. Распределение отказов по компонентам в силовой электронике: 30 % – конденсаторы; 26 % – печатные платы; 21 % – полупроводники; 13 % – пайка; 3 % – соединители; 7 % – прочее

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

2. Анализ механизмов отказов электронных компонентов

Рассмотрев механизмы отказов электронных компонентов, станет возможным выяснить причины и условия, подталкивающие электронный компонент к реализации сценария отказа. Отслеживая эти причины и условия, можно будет предупреждать о скором выходе из строя.

При рассмотрении отказов электронных компонентов будем считать, что при проектировании электрической схемы учтены предельные параметры компонентов и не допускаются нерабочие режимы компонентов, т.е. отказ не происходит от того, что устройство работает, устройство работает «правильно».

2.1. Конденсаторы

Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники. Сложно представить электронное устройство, в котором не было бы ни одного конденсатора. Поэтому в первую очередь рассмотрим основные механизмы отказа самых распространенных типов конденсаторов.

Керамические конденсаторы – пожалуй, самый распространенный тип конденсаторов, применяемой сегодня в электронике. Это тип конденсатора, в котором керамика используется как диэлектрический материал.

Одним из наиболее распространенных дефектов керамических конденсаторов является растрескивание диэлектрика. Изначально незначительная неоднородность в структуре конденсатора под влиянием циклических нагрузок активно распространяется в объеме диэлектрика. Внутренняя структура SMD керамического многослойного конденсатора с развившейся трещиной изображена на рис. 3. Наиболее распространенные механизмы отказа керамических конденсаторов приведены в табл. 1.

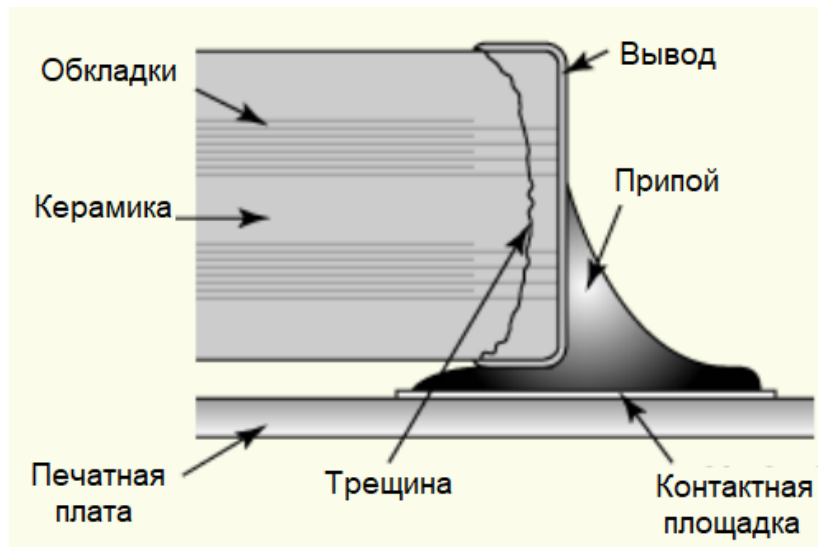


Рис. 3. Растрескивание диэлектрика в керамическом SMD конденсаторе (в разрезе)

Таблица 1

Механизмы отказов керамических конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Растрескивание диэлектрика	Образование трещин в керамике в следствие различных причин. Возможные проявления: запредельный ток утечки, закорачивание, снижение пробивного напряжения, обрыв и т.д. [8]	1. Тепловые удары 2. Резкие скачки напряжения 3. Упругие деформации печатной платы в случае с корпусами для поверхностного монтажа

Пленочные конденсаторы

Пленочные конденсаторы представляют собой конструкцию, в которой диэлектрик выполнен в виде пленки. Структура пленочных конденсаторов также чаще всего является многослойной, как и у керамических конденсаторов. Однако пленочные конденсаторы гораздо стабильнее керамических. Наиболее распространенные механизмы отказа пленочных конденсаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механизмы отказов пленочных конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Перегорание контакта между выводом и обкладкой конденсатора	Перегорание соединения может происходить при больших импульсах тока, а также при долговременном превышении переменного тока (определенной частоты)	1. Перегрев 2. Резкие скачки напряжения
Окисление металлизации	Проникновение влаги происходит из-за негерметичного корпуса и приводит к окислению металлизации. Наиболее уязвимы места крепления ножек [9]	Повышенная влажность

Танталовые конденсаторы

Танталовые конденсаторы – один из видов электролитических конденсаторов. Танталовые конденсаторы являются полярными. Эти конденсаторы характеризуются большой удельной емкостью, слабой температурной зависимостью емкости. В сравнении с алюминиевыми гораздо более долговечны и имеют меньшее эквивалентное последовательное сопротивление. Негативной стороной танталовых конденсаторов является высокая цена и строгие требования по соблюдению допустимых напряжений и токов (нормальной практикой считается использование конденсаторов с номинальным напряжением в два раза больше необходимого, а также ограничение зарядного тока внешним сопротивлением).

Уникальной особенностью танталовых конденсаторов является присущий только им механизм отказа – полевая кристаллизация диэлектрика. В результате механических повреждений или несовершенства технологического процесса в диэлектрике появляются неоднородности, которые являются эпицентрами кристаллизации при заряде конденсатора. Аморфный диэлектрик, кристаллизовавшись, многократно повышает свою проводимость. Если ток заряда не ограничен, процесс кристаллизации принимает лавинообразный характер и приводит к короткому замыканию. Последствием такого отказа может стать взрыв или возгорание [10, 11]. Основные отказы танталовых конденсаторов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механизмы отказов танталовых конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Растрескивание диэлектрика	Растрескивание диэлектрика значительно снижает устойчивость к импульсным токам, увеличивает ток утечки	1. Механические воздействия 2. Тепловые удары
Полевая кристаллизация диэлектрика	Под действием резкого изменения напряженности электрического поля кристаллизуется диэлектрик, его проводимость увеличивается на несколько порядков. Возможные проявления: недопустимый ток утечки, короткое замыкание, взрыв	1. Резкие токи заряда 2. Тепловой удар при пайке

Алюминиевые электролитические конденсаторы

Алюминиевые электролитические конденсаторы являются самой доступной емкостью. Несмотря на традиционно большие размеры алюминиевых конденсаторов, их объемная емкость также является сильной стороной алюминиевых конденсаторов. Алюминиевые конденсаторы так же, как и

танталовые, являются полярными. Хотя алюминиевые конденсаторы обладают несколько худшими электрическими характеристиками в сравнении с танталовыми, являются более неприхотливыми в использовании. Они допускают кратковременное перенапряжение, допускают подачу небольшого (около 1–1,5 вольт) напряжения в обратной полярности. Наиболее распространенные механизмы отказа алюминиевых электролитических конденсаторов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механизмы отказов алюминиевых конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Высыхание	Высыхание жидкого электролита из-за невозможности абсолютной герметичности корпуса. Проявляется снижением емкости и увеличением последовательного сопротивления	Повышенная температура

2.2. Обобщение механизмов отказов

Совместное рассмотрение данных из табл. 1–4 указывает на то, что механизмы отказов электронных компонентов технологий производства имеют одни и те же причины, подталкивающие к отказам электроники. Этими факторами являются: повышенная влажность, повышенная температура, перепады температуры (термоциклирование), механические циклические нагрузки (вибрации) и механические удары, повышенное напряжение.

Причина электрического пробоя полупроводника, который провоцируется разрядами статического электричества и при достаточном внимании к этой угрозе на этапе проектирования может быть сведен к минимуму, а в отдельных случаях даже полностью исключен.

Сделанные выводы в целом совпадают с анализом, выполненным в работах [12, 13].

Для того чтобы более наглядно продемонстрировать связь внешних воздействующих факторов на отказы, сгруппируем возможные отказы по воздействующим факторам. Результат представим в табл. 5.

Таблица 5

Связь воздействующих факторов с отказами электроники

Внешний воздействующий фактор	Связанные отказы
Повышенная влажность	1. Окисление металлизации пленочных конденсаторов 2. Образование проводящих нитей на печатной плате 3. Коррозия паяных соединений
Повышенная температура	1. Перегорание контакта между выводом и обкладкой пленочного конденсатора 2. Высыхание электролитического конденсатора 3. Образование проводящих нитей на печатной плате 4. Электромиграция в полупроводниках 5. Коррозия паяных соединений
Перепады температуры	1. Растрескивание диэлектрика в керамических конденсаторах 2. Растрескивание диэлектрика в танталовых конденсаторах 3. Разрушение сквозных металлизированных отверстий в печатных платах 4. Обрыв проволочных перемычек в корпусах полупроводниковых компонентов 5. Трещины кристаллов в корпусах полупроводниковых компонентов 6. Усталостное разрушение паяного соединения
Циклическая механическая нагрузка	1. Растрескивание диэлектрика в керамических конденсаторах 2. Растрескивание диэлектрика в танталовых конденсаторах 3. Отрыв контактных площадок на печатной плате 4. Усталостные разрушения паяного соединения

3. Модель учета влияющих факторов

3.1. Повышенная температура

Рассмотренные выше (см. табл. 5) 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 [14].

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 [15]. Уравнение Аррениуса связывает скорость протекания химической реакции с родом этой реакции и абсолютной температурой. Уравнение приведено в формуле

$$K = Ae^{-\frac{E_0}{kT}}, \quad (2)$$

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 [16].

Таким образом, ускоряющий фактор можно рассчитать по формуле

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{экс.}} \right)}, \quad (3)$$

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; $T_{экс.}$ – абсолютная температура эксплуатации; k – постоянная Больцмана.

Далее будем использовать усредненное значение E_a , равное 0,7 эВ. Тогда уравнение (3) можно записать в более практичном виде

$$AF_T = e^{8116 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{экс.}} \right)}, \quad (4)$$

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

3.2. 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 [17, 18]. Ускоряющий фактор для процессов старения, связанных с влажностью, описывается по формуле

$$AF_H = (RH)^3 e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{эсп.}} \right)}, \quad (5)$$

где AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; E_a – энергия активации; RH – относительная влажность; $T_{эсп.}$ – 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 (5) в более практичном виде

$$AF_H = (RH)^3 e^{5235 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эсп.}} \right)}, \quad (6)$$

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

3.3. 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.

Испытание на термоциклирование является одним из наиболее жестких, так как позволяет 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 [19] 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

$$AF_{TC} = \left(\frac{f_{эсп.}}{f_{н.у.}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{эсп.}}{\Delta T_{н.у.}} \right)^{1.9} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}^{MAX}} - \frac{1}{T_{эсп.}^{MAX}} \right)}, \quad (7)$$

где AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; $f_{н.у.}$ – частота изменения температуры в нормальных условиях; $f_{эсп.}$ – частота изменения температуры в условиях эксплуатации; $T_{эсп.}^{MAX}$ – максимальная абсолютная температура эксплуатации; $T_{н.у.}^{MAX}$ – максимальная абсолютная температура в нормальных условиях; $\Delta T_{эсп.}$ – перепад температуры в условиях эксплуатации; $\Delta T_{н.у.}$ – 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 (самом жар-

ком). Средний максимум составляет 24,3 °С, средний минимум – 14,4 °С [20]. Для удобства счета примем $\Delta T_{н.у.} = 10$ °С; $T_{н.у.}^{MAX} = 25$ °С. А частота изменения температуры в таком случае $f_{н.у.} = 1/\text{день}$. С учетом вышесказанного перепишем уравнение (7) в более удобном виде

$$AF_{TC} = f_{\text{эксп.}} \left(\frac{\Delta T_{\text{эксп.}}}{10} \right)^{1,9} e^{1414 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_{\text{эксп.}}^{MAX}} \right)}, \quad (8)$$

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

4. Общая математическая модель

В процессе эксплуатации электронное устройство подвергается воздействию внешних факторов, которые влияют на скорость протекания процессов старения (износа) электронных компонентов и электрических соединений, выполненных на печатной плате. Характер внешних воздействующих факторов непостоянен и с течением времени может непрерывно изменяться. Очевидно, что при воздействии нескольких воздействующих факторов их влияние складывается и старение электроники происходит быстрее. Отсюда следует, что итоговый ускоряющий фактор будет являться алгебраической комбинацией ускоряющих факторов, связанных с вибрацией, влажностью, температурой и изменением температуры. Запишем это в виде формулы

$$AF = k_V AF_V + k_T AF_T + k_{TC} AF_{TC} + k_H AF_H, \quad (9)$$

где AF – общий ускоряющий фактор; AF_V – ускоряющий фактор, связанный с вибрацией; AF_T – ускоряющий фактор, связанный с температурой; AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; k_V, k_T, k_{TC}, k_H – весовые коэффициенты для соответствующих ускоряющих факторов.

Оценка остаточного ресурса должна происходить, отталкиваясь от начального ресурса, заложенного в устройстве. В качестве такового будем использовать среднюю наработку до отказа, вычисленную по «справочному методу». Справочная надежность как раз характеризуется тем, что отражает характеристики компонентов при нормальных условиях.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния [21]. Строго говоря, предельное состояние в общем случае не то же самое, что и неработоспособное состояние. Однако тенденции развития электроники и ее постоянного усложнения привели к тому, что уже сегодня отказавшие модули не ремонтируются в силу большой сложности обнаружения неисправности и ее исправления, а просто заменяются. К тому же в сфере ответственного применения, где целесообразно применение методики оценки остаточного ресурса, повторное использование однажды отказавшего устройства не оправдано.

За основу выражения, описывающего остаточный ресурс электронного блока, возьмем выражение (1). Идея накапливаемых повреждений в состоянии системы, подверженной «мягким отказам», полностью соответствует влиянию внешних воздействий из табл. 5. Остаточный ресурс электронного блока будем определять по формуле

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{cp}} - \int_0^T AF(t) dt, \quad (10)$$

где $T_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс электронного блока; T_{cp} – средняя наработка до отказа; T – наработка; $AF(t)$ – общий ускоряющий фактор, изменяющийся во времени; $\int_0^T AF(t) dt$ – эффективная наработка.

Таким образом, уравнения (9) и (10) являются общей математической моделью для оценки остаточного ресурса электронного блока.

4.1. Требования к коэффициентам для ускоряющих факторов

Следуя логике выражений (9) и (10), заметим, что коэффициенты k_v , k_T , k_{TC} и k_H должны быть такими, чтобы при функционировании устройства в нормальных условиях его эффективная наработка совпадала с собственно наработкой. Запишем это условие в виде соотношения

$$T_{н.у.} = \int_0^{T_{н.у.}} AF(t)_{н.у.} dt, \tag{11}$$

где $T_{н.у.}$ – наработка в нормальных условиях; $AF(t)_{н.у.}$ – общий ускоряющий фактор в нормальных условиях; $\int_0^T AF(t)_{н.у.} dt$ – эффективная наработка.

В качестве нормальных условий примем следующее:

- средняя температура 20 °С;
- циклическое изменение температуры от 15 до 25 °С один цикл за сутки;
- относительная влажность воздуха 45 %;
- отсутствие механических нагрузок.

Будем считать, что изменение температур от 15 до 25 °С один раз в сутки – незначительно, и общий ускоряющий фактор в нормальных условиях можно считать неизменяющимся $AF(t)_{н.у.} = const$.

Тогда равенство (11) возможно только при $AF(t)_{н.у.} = const = 1$.

С другой стороны, вычислив общий ускоряющий фактор в нормальных условиях по формуле (9) и формулам (4), (6), (8) для соответствующих ускоряющих факторов, получим

$$1 = k_v \cdot 0 + k_T \cdot 1 + k_{TC} \cdot 1 + k_H \cdot 0,091; \tag{12}$$

$$1 = k_T + k_{TC} + 0,091 \cdot k_H,$$

где k_T – весовой коэффициент для ускоряющего фактора, связанного с температурой; k_{TC} – весовой коэффициент для ускоряющего фактора, связанного с термоциклированием; k_H – весовой коэффициент для ускоряющего фактора, связанного с влажностью.

Конкретные значения этих коэффициентов, а также коэффициента, связанного с вибрацией, подлежат экспериментальному установлению. В качестве начального приближения примем

$$k_T = k_{TC} = k_H = \frac{1}{1+1+0,091} = 0,48.$$

В силу сложностей в определении ускоряющего фактора для вибрации, а также нормировочного требования коэффициенту (так как в нормальных условиях механическая нагрузка отсутствует), для начального приближения примем значение коэффициента, связанного с вибрацией, равным нулю: $k_v = 0$. В дальнейшем, при накоплении достаточного количества данных об отказах, будет возможно провести регрессию, т.е. экспериментально определить, как параметры модели для механических усталостных повреждений, так и весовые коэффициенты.

Таким образом, окончательный вид математической модели для оценки остаточного ресурса электронного блока с начальными коэффициентами примет вид

$$T_{ост} = T_{ср} - \int_0^T 0,48(AF_T(t) + AF_{TC}(t) + AF_H(t))dt, \tag{13}$$

где $AF_T(t) = e^{8116 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эсп.}} \right)}$; $AF_{TC}(t) = f_{эсп.}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{эсп.}}{10} \right)^{1,9} e^{1414 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_{эсп.}^{MAX}} \right)}$; $AF_H(t) = (RH)^3 e^{5235 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эсп.}} \right)}$.

4.2. Корректировка значений весовых коэффициентов

Электронные блоки достаточно сильно различаются по используемым компонентам и конфигурации платы, как следствие, в сравнении с другими блоками устройство может оказаться более

восприимчиво к одним воздействующим факторам и менее восприимчиво к другим. Например, высокоскоростное цифровое устройство с плотной конфигурацией платы и широким использованием BGA корпусов и других корпусов с малым шагом выводов будет значительно уязвимо к влажности, термоциклированию и вибрации и почти не восприимчиво к повышенной температуре эксплуатации. Электронное устройство, использующее большое количество электролитических конденсаторов, будет очень восприимчиво к эксплуатации в среде с повышенной температурой. А такая характеристика, как геометрические параметры, сильно влияет на восприимчивость к механическим воздействиям.

При внедрении данной методики в новое устройство необходимо подвергнуть анализу проект электронного блока и методом экспертного оценивания определить значимости каждого из четырех воздействующих факторов. На основе проведенного анализа задать начальное приближение весовых коэффициентов ускоряющих факторов.

Кроме того, при оценке остаточного ресурса предлагаемым способом может оказаться, что производимая оценка сильно отличается от действительного остаточного ресурса: реальные отказы наступают гораздо раньше предполагаемого срока или, наоборот, рассчитываемое значение остаточного ресурса уменьшается слишком быстро и становится равным нулю, а устройство продолжает исправно функционировать.

В таком случае необходима корректировка весовых коэффициентов. Для проведения корректировки полезным будет соотношение вкладов каждого из четырех видов воздействий в эффективную наработку электронного блока. Вклады воздействий в эффективную наработку и их математические выражения представлены в табл. 6.

Таблица 6

Вклады воздействий в эффективную наработку

Вклад	Математическое выражение
Вклад вибрации	$T_V = \int_0^T k_V A F_V(t) dt$
Вклад температуры	$T_T = \int_0^T k_T A F_T(t) dt$
Вклад термоциклирования	$T_{TC} = \int_0^T k_{TC} A F_{TC}(t) dt$
Вклад влажности	$T_H = \int_0^T k_H A F_H(t) dt$

Проведя статистическую обработку вкладов воздействий, данных об испытанных устройствами внешних воздействиях, а также соотношения предсказанных сроков жизни и реальных наработок до отказа на статистически репрезентативной выборке устройств, можно скорректировать весовые коэффициенты таким образом, чтобы снизить расхождение между предсказанным сроком службы и реальной наработкой до отказа.

Корректировку весовых коэффициентов можно также проводить методом экспертного оценивания, а при достаточной выборке разумно использовать методы машинного обучения с учителем, для построения регрессии.

Заключение

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 остаточного ресурса электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации.

Таким образом, методика оценки остаточного ресурса электронного блока состоит из следующих шагов:

- 1) анализ условий эксплуатации на наличие перечисленных внешних воздействующих факторов;
- 2) отслеживание и регистрация количественных величин, характеризующих внешние воздействия;
- 3) вычисление ускоряющих факторов на основе данных о внешних воздействующих факторов по формулам (4), (6), (8), (10);
- 4) оценка остаточного ресурса по формуле (12);
- 5) корректировка весовых коэффициентов общей математической модели, параметров модели ускоряющего фактора, связанного с вибрацией.

Следует заметить, что п. 5 является обязательным только на стадии введения методики оценки остаточного ресурса электронного блока.

Предложенная методика позволит на основе предварительно подготовленных данных оценивать остаточный ресурс блока в зависимости от интегрального изменения таких воздействующих факторов, как вибрация, температура, влажность. Методику целесообразно применять в тех случаях, когда отказ электроники может приводить к причинению вреда здоровью человека, а также издержкам, многократно превышающим затраты на своевременное техническое обслуживание или замену.

Библиографический список

1. Catelani, M. On the application of neural networks to fault diagnosis of electronic analog circuits / M. Catelani, M. Gori // *Measurement*. – 1996. – Vol. 17, № 2. – P. 73–80.
2. Vandeveld, B. Methodology for solder-joint lifetime prediction of LED-based PCB assemblies / B. Vandeveld, A. Griffoni, F. Zanon, G. Willems // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. – 2018. – Vol. 18, № 3. – P. 377–382.
3. Schueller, R. Creep corrosion on lead-free printed circuit boards in high sulfur environments / R. Schueller // *SMTA News and Journal of Surface Mount Technology*. – 2008. – Vol. 21, № 1. – P. 21.
4. Liu, J. A multi-step predictor with a variable input pattern for system state forecasting / J. Liu, W. Wang, F. Golnaraghi // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – Vol. 23, № 5. – P. 1586–1599.
5. Wang, H. Remaining useful life estimation for degradation and shock processes / H. Wang et al. // *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. – Chengdu, China : IEEE, 2013. – P. 1762–1764.
6. Sood, B. Root-Cause Failure Analysis of Electronics / B. Sood. – SMTA Philadelphia, 2013.
7. Yang, S. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review / S. Yang et al. // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2010. – Vol. 25, № 11. – P. 2734–2752.
8. Wang, H. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters – An overview / H. Wang, F. Blaabjerg // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2014. – Vol. 50, № 5. – P. 3569–3578.
9. Gallay, R. Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis / R. Gallay // *arXiv preprint arXiv:1607.01540*. – 2016.
10. Teverovsky, A. Derating of surge currents for tantalum capacitors / A. Teverovsky // *Space Passive Component Days : ESA 1st International Symposium*. – 2013.
11. Zednicek, T. A Study of Field Crystallization in Tantalum Capacitors and its effect on DCL and Reliability / T. Zednicek, J. Sikula, H. Leibovitz // *CARTS USA*. – 2009. – P. 315–319.
12. Кочегаров, И. И. Особенности исследования динамических характеристик печатных узлов в двухмерных задачах / И. И. Кочегаров, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // *Надежность и качество сложных систем*. – 2015. – № 2.
13. Mathematical modeling of heterogeneous structure dynamics of an electronic block under applied shock / D. V. Artamonov, A. N. Litvinov, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. V. Lysenko // *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. – IEEE, 2018. – P. 224–228.
14. Hallberg, Ö. Recent humidity accelerations, a base for testing standards / Ö. Hallberg, D. S. Peck // *Qual. Reliab. Engng. Int.* – 1991. – Vol. 7, № 3. – P. 169–180.
15. Thermal stability of magnetic tunneling junctions with MgO barriers for high temperature spintronics / X. Liu, D. Mazumdar, W. Shen, B. D. Schrag, G. Xiao // *Applied physics letters*. – 2006. – Vol. 89, № 2. – P. 023504.
16. Huang, C. Y. DOM Products: Activation Energy Estimation and Reliability Assessment / C. Y. Huang, Y. H. Lin, E. Huang // *AMM*. – 2013. – Vol. 470. – P. 781–784.
17. Bojta, P. Searching for appropriate humidity accelerated migration reliability tests methods / P. Bojta // *Microelectronics Reliability*. – 2002. – P. 6.

18. Ohring, M. Environmental Damage to Electronic Products / M. Ohring, L. Kasprzak // Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices. Elsevier. – 2015. – P. 387–441.
19. McNally, L. Board Level Reliability Primer for Embedded Processors / L. McNally. – 2015. – P. 7.
20. Климат Москвы // Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=364638&oldid=111514964> (дата обращения: 05.09.2020).
21. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.

References

1. Catelani M., Gori M. *Measurement*. 1996, vol. 17, no. 2, pp. 73–80.
2. Vandeveld B., Griffoni A., Zanon F., Willems G. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2018, vol. 18, no. 3, pp. 377–382.
3. Schueller R. *SMTA News and Journal of Surface Mount Technology*. 2008, vol. 21, no. 1, p. 21.
4. Liu J., Wang W., Golnaraghi F. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009, vol. 23, no. 5, pp. 1586–1599.
5. Wang H. et al. *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. Chengdu, China: IEEE, 2013, pp. 1762–1764.
6. Sood B. *Root-Cause Failure Analysis of Electronics*. SMTA Philadelphia, 2013.
7. Yang S. et al. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752.
8. Wang H., Blaabjerg F. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578.
9. Gallay R. *Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis*. 2016. arXiv preprint arXiv:1607.01540.
10. Teverovsky A. *Space Passive Component Days: ESA 1st International Symposium*. 2013.
11. Zednicek T. A., Sikula J., Leibovitz H. *CARTS USA*. 2009, pp. 315–319.
12. Kochegarov I. I., Tan'kov G. V., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 2. [In Russian]
13. Artamonov D. V., Litvinov A. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. IEEE, 2018, pp. 224–228.
14. Hallberg Ö., Peck D. S. *Qual. Reliab. Engng. Int.* 1991, vol. 7, no. 3, pp. 169–180.
15. Liu X., Mazumdar D., Shen W., Schrag B. D., Xiao G. *Applied physics letters*. 2006, vol. 89, no. 2, p. 023504.
16. Huang C. Y., Lin Y. H., Huang E. *AMM*. 2013, vol. 470, pp. 781–784.
17. Bojta P. *Microelectronics Reliability*. 2002, p. 6.
18. Ohring M., Kasprzak L. *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*. Elsevier. 2015, pp. 387–441.
19. McNally L. *Board Level Reliability Primer for Embedded Processors*. 2015, p. 7.
20. *Klimat Moskvy* [The Climate Of Moscow]. Wikipedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/?curid=364638&oldid=111514964> (accessed: 05.09.2020). [In Russian]
21. GOST 27.002-2015 *Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya* [GOST 27.002-2015 Reliability in engineering (SSNT). Terms and definitions]. [In Russian]

Кочегаров Игорь Иванович

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

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Kochegarov Igor' Ivanovich

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

Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design and
production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Абдирашев Омирзак Коптилеуович

старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Нур-Султан (Астана),
ул. К. Сатпаева, 2А)
E-mail: omeke_92@mail.ru

Ергалиев Дастан Сырымович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой космической техники
и технологий,
Евразийский Национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Нур-Султан (Астана),
ул. К. Сатпаева, 2А)
E-mail: DES-67@yandex.kz

Тулугулов Амандос Дабысович

кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационных технологий,
Казахский университет технологий и бизнеса
(Казахстан, г. Нур-Султан (Астана),
ул. К. Мухамедханова, 37 А)
E-mail: tad62@yandex.kz

Abdirashev Omirzak Koptileuovich

senior lecturer,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(2A K. Satpayev street, Nur-Sultan (Astana), Kazakh-
stan)

Ergaliev Dastan Syrymovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of space engineering
and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(2A K. Satpayev street, Nur-Sultan (Astana), Kazakh-
stan)

Tulegulov Amandos Dabysovich

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
head of sub-department of information technology,
Kazakh University of Technology and Business
(37 A K. Muhamedhanova street, Nur-Sultan (Astana),
Kazakhstan)

Образец цитирования:

Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов / И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, О. К. Абдирашев, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулугулов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 58–72. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-7.