

## УЧЁТ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Бондарев Владислав Николаевич**

*магистрант 2-го года обучения,  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Республика Беларусь, г. Минск*

**Боровиков Сергей Максимович**

*канд. техн. наук, доц.,  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Республика Беларусь, г. Минск*

**Будник Артур Владимирович**

*канд. техн. наук, доц.,  
Белорусская государственная академия связи,  
Республика Беларусь, г. Минск*

## CONSIDERATION OF THERMO MECHANICAL STRESSES IN ASSESSING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF PRINTED BOARDS

**Vladislav Bondarev**

*Master student of the 2nd year of study  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Republic of Belarus, Minsk*

**Sergei Borovikov**

*Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Republic of Belarus, Minsk*

**Artur Budnik**

*Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Belarusian State Academy of Communications,  
Republic of Belarus, Minsk*

### АННОТАЦИЯ

Модели прогнозирования надёжности печатных плат, включённые в справочник по надёжности электрорадиоизделий (Россия) и военный справочник по прогнозированию надёжности электронного оборудования (США), основаны на статистических данных о надёжности печатных плат и не учитывают термомеханические напряжения, появляющиеся в конструктивных элементах печатных плат (печатные проводники, диэлектрическое основание, соединения) при циклическом режиме работы электронных устройств. Это в определённой степени ограничивает достоверность оценки эксплуатационной надёжности печатных плат. Актуальным является получение для печатных плат модели надёжности, учитывающей термомеханические напряжения, обусловленные изменениями температуры при эксплуатации печатных плат в составе электронных устройств. В работе показано, как учесть влияние на эксплуатационную надёжность печатных плат термомеханических напряжений, появляющихся в конструктивных элементах печатных плат. С учётом этого уточнена модель прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат, которая обеспечивает более высокую достоверность получаемых результатов.

### ABSTRACT

The models for predicting the reliability of printed circuit boards, given in the handbook for calculating the reliability of electrical radio components (Russia) and the military handbook for calculating the reliability of electronic equipment (USA), are based on statistical data on the reliability of printed circuit boards. The models do not take into account thermo mechanical stresses that appear in the structural elements of printed circuit boards (printed conductors, dielectric base, connections) during the cyclic operation of electronic devices. This, to a certain extent, limits the reliability of the assessment of the operational reliability of printed circuit boards. It is important to obtain a reliability model for printed circuit boards that takes into account thermo mechanical stresses caused by temperature changes during the operation of printed circuit boards as part of electronic devices. The paper shows how to take into account the effect on the operational reliability of printed circuit boards of thermo mechanical stresses that appear in the structural elements of printed

circuit boards. With this in mind, the model for predicting the operational reliability of printed circuit boards has been refined, which provides a higher reliability of the results obtained.

**Ключевые слова:** электронные устройства, печатные платы, эксплуатационная надёжность, циклический режим работы, термомеханические напряжения, модель прогнозирования надёжности.

**Keywords:** electronic devices, printed circuit boards, operational reliability, cyclic operation, thermo mechanical stresses, reliability prediction model.

**Введение.** Оборудование различного функционального назначения включает электронные устройства, содержащие модули, выполнение с использованием печатного монтажа. Электронные устройства и печатные платы в их составе в большинстве случаев используются в циклическом режиме работы: после включения и применения по назначению в течение некоторого времени электронные устройства выключаются и находятся в режиме ожидания перед следующим применением. При включении электронного устройства из-за протекания электрического тока через элементы повышается температура электрорадиоэлементов и воздуха внутри электронного устройства, а также температура конструктивных элементов печатной платы (диэлектрического основания, печатных проводников и электрических соединений – точек паек). При выключении электронного устройства температура конструктивных элементов печатных плат уменьшается, постепенно принимая значение температуры окружающей среды. Изменение температуры печатной платы из-за циклического режима работы электронных устройств приводит к появлению термомеханических напряжений в конструктивных элементах печатной платы [1, с. 106]. Эти напряжения влияют на зазоры между проводниками и могут привести к отслоению проводящих проводников печатной платы, вызвать деформации как в диэлектрическом основании, так и в соединениях, что приводит к изменению их электрических свойств [1, с. 37]. В процессе эксплуатации указанные изменения могут привести к отказу конструктивных элементов печатной платы и, следовательно, к отказу электронного устройства.

В режиме ожидания электронного устройства перед очередным применением по функциональному назначению в конструктивных элементах печатных плат также появляются термомеханические напряжения, поскольку при хранении обычно имеет место перепад между дневной и ночной температурой, особенно в неотапливаемых помещениях. Термомеханические напряжения, появляющиеся при хранении, имеют меньшие уровни, нежели при включении и последующем выключении электронного устройства, но также могут привести к изменению свойств и отказу конструктивных элементов печатных плат. Поэтому при оценке эксплуатационной надёжности печатных плат следует учесть периодическое появление в печатных платах термомеханических напряжений как за счёт включения и последующего выключения устройств, так и вследствие перепада температур (между дневной и ночной) при хранении устройств.

**Актуальность исследований.** Модели прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат, включённые в справочники по расчёту надёжности электрорадиоизделий и электронного оборудования [2–4] основаны на статистических данных о надёжности печатных плат и соединений и прямо не учитывают возможные отказы из-за возникновения термомеханических напряжений в конструктивных элементах печатных плат при работе и хранении электронных устройств. Поэтому оценка эксплуатационной надёжности печатных плат с использованием этих справочников характеризуется ограниченной достоверностью.

Актуальным является использование для прогнозирования надёжности печатных плат такой модели, которая учитывала бы изменение температуры конструктивных элементов печатной платы при включении и выключении электрического питания, а также перепад температуры при хранении (бездействии, ожидании электронного устройства перед очередным применением по функциональному назначению).

**Получение модели прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат.** Циклический характер работы электронных устройств и появляющиеся термомеханические напряжения в конструктивных элементах печатной платы как в режиме работы электронного устройства (с включением и последующим выключением электрического питания), так и в режиме хранения, предлагается учесть с помощью модели

$$\lambda_{\text{э.ПП}} = \lambda_{\text{к.э.ц}} + \Delta\lambda_{\text{терм-мех}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{э.ПП}}$  – эксплуатационная интенсивность отказов печатной платы совместно с электрическими соединениями на ней (точками паек и др.);

$\lambda_{\text{к.э.ц}}$  – начальная (исходная) интенсивность отказов печатной платы совместно с соединениями с учётом её конструкторско-технологических особенностей, эксплуатационных факторов и циклического режима работы в составе электронного устройства;

$\Delta\lambda_{\text{терм-мех}}$  – дополнительная интенсивность отказов, обусловленная появлением термомеханических напряжений в конструктивных элементах печатной платы из-за температурных изменений, происходящих в режиме работы и режиме хранения электронного устройства.

Согласно [6, с. 20; 7] интенсивность отказов  $\lambda_{\text{к.э.ц}}$  определяется как

$$\lambda_{к.э.ц} = (\lambda_{к.э} + \sum \lambda_{соед}) \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^m (K_i)_i \cdot \tau_i}{\tau_{вкл} + \tau_{выкл}} \right) \cdot 10^{-9}, 1/ч, \quad (2)$$

а дополнительная интенсивность отказов  $\Delta\lambda_{терм-мех}$ , обусловленная появлением термомеханических напряжений, – по выражению [5, с. 22; 6, с. 20; 7]

$$\Delta\lambda_{терм-мех} = \left[ \lambda_{к.э.ц} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \sum_{j=1}^{m+l} (K_{ц})_j \cdot (\Delta t_j)^{0,68} \right] \cdot 10^{-9}, 1/ч. \quad (3)$$

Пояснения параметров, входящих в выражения (2) и (3), приводятся в таблице 1.

Таблица 1.

Пояснение параметров выражений (2) и (3)

| Обозначение параметра    | Пояснение, смысл параметра  |
|--------------------------|---|
| $\lambda_{к.э}$          | Начальная интенсивность отказов печатной платы с учётом её конструкторских особенностей (размер, количество слоёв, число печатных проводников и их ширина, количество отверстий), эксплуатационных факторов, жёсткости требований к контролю качества печатных плат в условиях производства |
| $\sum \lambda_{соед}$    | Сумма интенсивностей отказов соединений (точек паяк, монтажных соединений, металлизированных отверстий, других способов соединения)   |
| $i$                      | Индекс, учитывающий этапы работы при наличии питания (от включения до выключения электронного устройства); $i = 1, \dots, m$  |
| $m$                      | Число этапов работы (наработки) для печатной платы с разными значениями температуры окружающей среды $t_{окр.i}$  |
| $(K_i)_i$                | Коэффициент, учитывающий температуру печатной платы для $i$ -го рабочего этапа (при наличии электрического питания)   |
| $\tau_i$                 | Годовая доля времени для печатной платы в постоянном режиме работы с питанием и температуре ( $t_{окр.i} + \Delta t_{в.i}$ )  |
| $\tau_{вкл}$             | Общая годовая доля времени для печатной платы в рабочем режиме (при наличии электрического питания)   |
| $\tau_{выкл}$            | Общая годовая доля времени для печатной платы в нерабочем режиме (режиме бездействия, хранения, ожидания)   |
| $l$                      | Число этапов в нерабочем режиме (режиме хранения, ожидания)   |
| $j$                      | Индекс, учитывающий все этапы эксплуатации (этапы работы с питанием и этапы в нерабочем режиме); $j = 1, \dots, m+l$  |
| $n_j$                    | Количество циклов в год для $j$ -го этапа эксплуатации, которым подвергается печатная плата с температурными изменениями $\Delta t_j$   |
| $(K_{ц})_j$              | Коэффициент, учитывающий число циклов в год $n_j$ для $j$ -го этапа эксплуатации с изменением температуры $\Delta t_j$ в этом этапе   |
| $\Delta t_j, \Delta t_i$ | Соответственно средняя амплитуда температурного изменения в циклах $j$ -го этапа эксплуатации, $i$ -го рабочего этапа   |
| $t_{окр.i}$              | Средняя температура наружного воздуха вокруг электронного устройства для $i$ -го рабочего этапа   |
| $\Delta t_{в.i}$         | Средний перегрев воздуха вблизи печатной платы (рядом с элементами) относительно температуры $t_{окр.i}$ для $i$ -го рабочего этапа (при наличии электрического питания)  |
| $t_{пп.i}$               | Средняя температура окружающего воздуха вблизи печатной платы (возле электрорадиоэлементов) для $i$ -го рабочего этапа  |
| $\Delta t_{max}$         | Перегрев относительно температуры $t_{пп.i}$ наиболее теплонагруженного элемента на печатной плате  |

Для величин  $\tau_{вкл}$  и  $\tau_{выкл}$ , входящих в выражение (2), должны выполняться следующие условия:  $\tau_{вкл} + \tau_{выкл} = 1$  при использовании относительных величин;  $\tau_{вкл} + \tau_{выкл} = 100$ , если  $\tau_{вкл}$  и  $\tau_{выкл}$  выражаются в

процентах. Итоговое значение  $\tau_{вкл}$  определяется как сумма

$$\tau_{\text{вкл}} = \sum_{i=1}^m \tau_i \quad (4)$$

Если температура воздуха, окружающего электронное устройство, постоянна в течение интересующего непрерывного времени работы, то для

$$\Delta t_i = \left( t_{\text{шт.}i} + \frac{\Delta t_{\text{max}}}{3} \right) - t_{\text{окр.}i} = \Delta t_{\text{в.}i} + \frac{\Delta t_{\text{max}}}{3} \quad (5)$$

Пояснения параметров формулы (5) включены в таблицу 1. Коэффициенты  $(K_i)_i$  рекомендуется определять по формуле

$$(K_i)_i = \exp \left[ 1740 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{273 + t_{\text{шт.}i}} \right) \right], \quad (6)$$

а коэффициенты  $(K_{\text{ц}})_j$ , учитывающие число циклов в год с изменением температуры  $\Delta t_j$ , – по формуле [5, с. 22]

$$(K_{\text{ц}})_j = n_j^{0.76}, \quad n_j \leq 8760 \text{ циклов/год} \quad (7)$$

Для этапа хранения (ожидания, бездействия):

$\Delta t_j$  = среднее значение изменения  $t_{\text{окр}}$  за цикл для  $j$ -го этапа.

Учитывая выражения (2) и (3) и запись (1), была получена уточнённая модель прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат. Полный вид этой модели приведён в [6, с. 20; 7]. Используя модель, можно для заданного календарного времени  $t$  определить вероятность безотказной

печатной платы имеет место один рабочий этап ( $m = 1$ ) и, следовательно,  $\tau_i = \tau_1 = \tau_{\text{вкл}}$ .

Для  $i$ -го этапа работы (от включения до выключения электронного устройства) при циклическом режиме применения электронного устройства  $\Delta t_i$  можно определять по формуле [5, с. 17]

работы печатной платы. Пример применения модели приведён в [6, с. 22–24]. В таблице 2 на основе анализа этого примера представлено сравнение результатов, полученных с использованием модели, включённой в справочник [3, с. 599–601], и уточнённой модели [6, с. 20], учитывающий циклический режим работы электронного устройства и возможные появления термомеханических напряжений в конструктивных элементах печатной платы.

Таблица 2.

Сравнение результатов расчёта эксплуатационной надёжности печатной платы

| Модель прогнозирования эксплуатационной надёжности | Заданная наработка $t_3$ , ч | Рассматриваемая календарная продолжительность $t$ , ч | Вероятность безотказной работы $P(t_3 t)$ |
|--|------------------------------|---|---|
| Справочник [3, с. 599–601]                         | 4180                         | Не определена   | 0,9986                                    |
| Уточнённая модель [6, с. 20]                       | 4180                         | 8760 (один год)                                       | 0,9913                                    |

Из таблицы 2 видно, что уточнённая модель прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат даёт меньшее значение вероятности безотказной работы  $P(t_3|t)$  для календарного периода  $t = 8760$  ч (один год) при одной и той же заданной наработке  $t_3 = 4180$  ч, как и в случае использования модели, включённой в справочник [3]. Более достоверным следует признать результат, полученный с использованием уточнённой модели, поскольку она учитывает термомеханические напряжения, появление которых в конструктивных элементах печатной платы обусловлено изменением их температуры при циклическом режиме работы электронного устройства и возможным перепадом

между дневной и ночной температурой при хранении (бездействии, ожидании электронного устройства перед очередным применением).

**Заключение.** В работе рассмотрен поход, позволивший получить уточнённую модель прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат. Эта модель обеспечивает более достоверные итоговые показатели надёжности печатных плат за счёт учёта влияния на надёжность плат термомеханических напряжений, появляющихся в конструктивных элементах печатных плат под воздействием температурных изменений, обусловленных циклическим режимом работы и хранением электронных устройств перед очередным их применением.

**Список литературы:**

1. Медведев А.М. Надёжность и контроль качества печатного монтажа. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
2. Боровиков С.М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
3. Прытков С.Ф. Надёжность электрорадиоизделий: справочник / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, А.А. Борисов. – М.: ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ», 2008. – 641 с.
4. Reliability prediction of electronic equipment: Military Handbook MIL-HDBK-217F, Notice 2. – Washington: Department of defense DC 20301, 1995. – 205 p.
5. A universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment. RDF 2000: reliability data handbook. – Paris: UTE C 80-810, 2000.– 99 p.
6. Боровиков С.М. Модель прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат с учётом цикличности работы и температурных режимов эксплуатации / С.М. Боровиков, В.Н. Бондарев // GLOBUS: технические науки. – 2021. – № 4 (40). – С. 17-23.
7. Боровиков С.М. Прогнозирование эксплуатационной надёжности печатных плат электронного контрольно-измерительного оборудования систем телекоммуникаций / С.М. Боровиков, А.В. Будник, В.Н. Бондарев // Современные средства связи: материалы XXVI Международной научно-технической конференции, Минск, 21–22 октября 2021 г. – Минск: БГАС, 2021. – С. 241-243.