

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, РАДИОТЕХНИКА

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С УЧЁТОМ ЦИКЛИЧНОСТИ РАБОТЫ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Боровиков Сергей Максимович

кандидат технических наук, доцент,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, город Минск

Бондарев Владислав Николаевич

магистрант 2-го года обучения,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, город Минск

MODEL FOR PREDICTION OF PERFORMANCE RELIABILITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS TAKING INTO ACCOUNT CYCLES OF OPERATING TIME AND TEMPERATURE REGIMES OF USING

Sergei M. Borovikov,

PhD, Associate professor,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus

Vladislav N. Bondarev,

Master of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus.

Аннотация. Предложена модель для прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат, имеющих монтажные отверстия для установки элементов с выводами и контактные площадки для монтажа SMD-элементов на поверхность печатной платы. Отличительной особенностью модели является учёт циклического характера работы электронного модуля и учёт термомеханических напряжений, возникающих в печатной плате и соединениях при изменении температуры (при работе, при хранении). Приводится пример применения модели.

Abstract. A model is proposed for predicting the operational reliability of printed circuit boards, which include mounting holes for installing output elements and contact pads for mounting SMD elements on the surface of a printed circuit board. A distinctive feature of the model is taking into account the cyclical nature of the operation of the electronic module and taking into account the thermo mechanical stresses that arise in the printed circuit board and connections when the temperature changes (during operation, during storage). An example of the application of the model is given.

Ключевые слова: электронная аппаратура, печатная плата, цикличность работы, термомеханические напряжения, модель прогнозирования надёжности.

Keywords: electronic equipment, printed circuit board, cyclic operation, thermo mechanical stresses, reliability prediction model.

Введение

Печатные платы, применяемые в электронной аппаратуре, в определённой степени определяют эксплуатационную надёжность электронных модулей (печатных узлов) и, следовательно, электронных устройств в целом. Миниатюризация электронных устройств приводит к увеличению плотности монтажа на печатных платах, снижению ширины проводников и зазоров, уменьшению диаметров межслойных отверстий печатных плат. Электронные устройства и печатные платы в их составе во многих случаях имеют циклический режим работы: после включения и использования в течение некоторого времени по их назначению электронное устройство выключается и находится в режиме ожидания перед следующим использованием. После включения устройства из-за протекания электрического тока через элементы повышается температура элементов и воздуха внутри электронного устройства, а также температура печатной платы. При повышении температуры возникают термомеханические напряжения, которые влияют на зазоры между проводниками и могут привести к отслоению проводящего рисунка печатной платы и возникновению отказа электронного модуля (печатного узла). Поэтому оценке и обеспечению надёжности печатных плат следует уделять особое внимание.

Актуальность работы

Достоверность оценки надёжности электронных устройств во многом определяется степенью точности учёта факторов, влияющих на надёжность печатных плат. Приводимые в справочниках по расчёту надёжности электронного оборудования модели прогнозирования эксплуатационной надёжности печатных плат [2, 6] имеют определённые ограничения и не учитывают некоторые важные

влияющие факторы (площадь платы, количество печатных проводников, ширину печатных дорожек и др.).

Учёт факторов, влияющих на надёжность печатных плат, более полно сделан в модели, приводимой в справочнике [4]. Но описание и модель относятся к телекоммуникационному и компьютерному оборудованию гражданских самолётов и аппаратуре для нестационарного применения на земле с умеренным климатом (бортовые автомобильные калькуляторы, военные мобильные радиостанции и т. п. [4, с. 5-6]. Кроме того, модель, приводимая в [4], не даёт ответ на вопрос, как учесть переходные металлизированные отверстия в многослойных печатных платах. Актуальным является разработка для печатных плат такой модели прогнозирования надёжности, которая была бы пригодной для электронных устройств разного функционального назначения, и которая принимала бы во внимание достоинства моделей, приводимых в справочниках [2, 6].

Подход к получению модели надёжности печатных плат

В качестве основы для получения модели прогнозирования надёжности печатных плат использована модель, приводимая в справочнике [4]. Эта модель адаптирована применительно к электронным устройствам разного функционального назначения, по режимам эксплуатации характеризуемым многократным циклическим применением согласно ГОСТ 27.003-90 [3].

Эксплуатационную интенсивность отказов печатной платы (обозначим через $\lambda_{з.пп}$) предлагается определять, как

$$\lambda_{з.пп} = \lambda_{осн} + \sum \lambda_{соед}. \quad (1)$$

где $\lambda_{осн}$ – интенсивность отказов основания печатной платы с токопроводящими печатными проводниками; $\sum \lambda_{соед}$ – сумма интенсивностей отказов соединений (точек паяк монтажных соединений, включая пайки металлизированных отверстий).

В статье рассматривается получение модели для прогнозирования значения $\lambda_{з.пп}$ с учётом циклического характера работы электронного устройства, наличия этапов работы (наработки) и этапов ожидания (хранения) перед следующим использованием электронного устройства по функциональному назначению.

Из справочника [4] заимствован подход, используемый применительно к учёту числа годовых циклов с температурными изменениями печатной платы и соединений из-за их нагрева после включения электронного устройства и их остывания после выключения устройства с дальнейшим его ожиданием перед следующим включением. Для учёта годовых циклов эксплуатации использован множитель [4, с. 22]

$$3 \cdot 10^{-3} \left[\sum_{i=1}^n (K_{ц})_i \cdot (\Delta t_i)^{0,68} \right], \quad (2)$$

где n – количество циклов в год для i -го этапа эксплуатации, которым подвергается печатная плата и соединения с температурными изменениями Δt_i ; $(K_{ц})_i$ – коэффициент, учитывающий число циклов в год с изменением температуры Δt_i ; Δt_i – средняя амплитуда теплового изменения в циклах i -го этапа эксплуатации.

Для этапа работы (от включения до выключения электронного устройства) Δt_i рекомендуется определять по формуле [4, с. 17]

$$\Delta t_i = \left(t_{пп.i} + \frac{\Delta t_{max}}{3} \text{Оокр.}i_{в.i} \frac{\Delta t_{max}}{3} \right), \quad (3)$$

где $t_{пп.i}$ – средняя температура окружающего воздуха вблизи печатной платы (возле элементов) для i -го рабочего этапа; Δt_{max} – перегрев относительно температуры $t_{пп.i}$ наиболее теплонагруженного элемента на печатной плате; $t_{окр.i}$ – 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.

Для этапа хранения (ожидания, бездействия):

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

Учёт общей годовой доли времени в режиме работы печатной платы (при наличии питания, следовательно, токовой нагрузки печатных проводников и соединений) предлагается сделать с помощью множителя, как это выполняется для пассивных элементов, например резисторов [4, с. 66]:

$$\frac{\sum_{i=1}^m (K_i)_i \cdot \tau_i}{\tau_{вкл} + \tau_{выкл}}, \quad (4)$$

где $(K_i)_i$ – коэффициент, учитывающий температуру печатной платы для i -го рабочего этапа; τ_i – годовая доля времени для печатной платы в постоянном режиме работы с питанием и температуре ($t_{окр.i} + \Delta t_{в.i}$); m – число этапов работы (наработки) для печатной платы с разными значениями температуры окружающей среды $t_{окр.i}$; $\tau_{вкл}$ – общая годовая доля времени для печатной платы в рабочем режиме; $\tau_{выкл}$ – общая годовая доля времени для печатной платы в нерабочем режиме (бездействия, хранения, ожидания).

Сомножитель (4) записан с учётом того, что величины τ_i , $\tau_{вкл}$ и $\tau_{выкл}$ могут подставляться в формулу либо в относительных единицах, либо в процентах. Должно выполняться условие $\tau_{вкл} + \tau_{выкл} = 1$ при использовании относительных величин или $\tau_{вкл} + \tau_{выкл} = 100$, если $\tau_{вкл}$ и $\tau_{выкл}$ выражаются в процентах.

Значение $\tau_{вкл}$ определяется как сумма

$$\tau_{вкл} = \sum_{i=1}^m \tau_i. \quad (5)$$

При неизменной температуре наружного воздуха, окружающего электронную аппаратуру, для печатной платы имеет место один рабочий этап ($m = 1$) и, следовательно, $\tau_i = \tau_1 = \tau_{вкл}$.

Как отмечалось, модель прогнозирования интенсивности отказов печатной платы, приведённая в [4], относится к телекоммуникационному и компьютерному оборудованию гражданских самолётов и оборудованию для нестационарного использования на земле в умеренном климате. Для таких условий обобщённое (усреднённое) значение коэффициента эксплуатации $K_э$ для печатных плат и соединений, в том числе пайкой, примерно составляет $K_э = 4,5$ [2, с. 599, 600; 6, с. 16-1, 17-1]. Коэффициент $K_э$ учитывает степень жёсткости условий эксплуатации, кроме температуры, и показывает, во сколько раз интенсивность отказов печатной платы и соединений в аппаратуре конкретной группы эксплуатации выше, чем в наземной стационарной аппаратуре, используемой в обычных нормальных условиях. Поскольку предлагаемая модель должна быть применима к любым условиям, указанным в [2, 6], то в неё введём поправочный коэффициент эксплуатации $K_э$ и приведём записанную в модели [4, с. 22] базовую интенсивность отказов к значению $K_э = 1$. Для этого выполним деление константы $5 \cdot 10^{-3}$, стоящей в начале модели, на число равное коэффициенту $K_э = 4,5$. Кроме того, введём в модель коэффициент приёма $K_п$, учитывающий степень жёсткости требований к контролю качества и правила приёма печатных плат и соединений в условиях производства.

Модель прогнозирования эксплуатационной надёжности

С учётом указанных предпосылок, в том числе описываемых выражениями (1)–(5), модель прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов печатной платы, включая её основание и соединения, выполняемые пайкой припоем, получена в виде

$$\lambda_{э.пп} = \left\{ \left[1,11 \cdot 10^{-3} K_э K_п K_{сл} \left(N_э \sqrt{1 + \frac{N_э}{S}} + N_{пр} \frac{1 + 0,1\sqrt{S}}{3} K_{ш} \right) + \sum \lambda_{соед} \right] \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^m (K_i)_i \cdot \tau_i}{\tau_{вкл} + \tau_{выкл}} \right) \right\} \times \\ \times \left\{ 1 + 3 \cdot 10^{-3} \left[\sum_{i=1}^n (K_{п})_i \cdot (\Delta t_i)^{0,68} \right] \right\} \cdot 10^{-9}, 1/\text{ч}, \quad (6)$$

где $K_{сл}$ – коэффициент, учитывающий количество слоёв l печатной платы; $N_э$ – общее количество отверстий в печатной плате (монтажных и переходных); S – площадь печатной платы в см²; $N_{пр}$ – количество печатных проводников; $K_{ш}$ – коэффициент, учитывающий влияние ширины b проводящих дорожек (печатных проводников).

Коэффициент $K_{сл}$ и количество печатных проводников $N_{пр}$ определяют по выражениям [4, с. 22]

$$K_{сл} = 1 \text{ при } l \leq 2; K_{сл} = 0,7 \cdot \sqrt{l} \text{ при } l > 2, \quad (7)$$

$$N_{пр} = \frac{N_{пов} + N_{отв}}{2}, \quad (8)$$

где $N_{пов}$ – количество на печатной плате соединений для элементов поверхностного монтажа; $N_{отв}$ – количество соединений для элементов, использующих сквозной монтаж через отверстия печатной платы.

Поправочные коэффициенты $(K_i)_i$ согласно справочнику [4,] можно рассчитать по формуле

$$(K_r)_i = \exp \left[1740 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + t_{\text{пл}i}} \right) \right]. \quad (9)$$

Значения поправочных коэффициентов $K_{\text{ш}}$, рекомендованные в справочнике [4, с. 22], приведены в таблице 1.

Таблица 1

Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние ширины печатных проводников, $K_{\text{ш}}$

Преимущественная ширина печатного проводника b , мм	0,56	0,35	0,23	0,15	0,10	0,08
Значение $K_{\text{ш}}$	1	2	3	4	5	6

Коэффициенты $(K_{\text{ш}})_i$, учитывающие число циклов в год, определяются выражением [4, с. 22]

$$(K_{\text{ш}})_i = n_i^{0,76}, n_i \leq 8760 \text{ циклов/год}, \quad (10)$$

где n_i – годовое количество циклов с изменением температуры Δt_i .

Слагаемое $\Sigma \lambda_{\text{соед}}$ модели (6) с учётом работ [2, 6] может быть представлено в виде

$$\Sigma \lambda_{\text{соед}} = \{N_p \lambda_{\text{Б.р}} + N_v \lambda_{\text{Б.в}} + \lambda_{\text{Б.меж}} [N_1 K_{\text{сл}} + N_2 (K_{\text{сл}} + 13)]\} K_3 K_{\text{п}}. \quad (11)$$

где N_p , N_v – количество соединений для элементов, пропаянных соответственно ручным способом и способом «пайка волной», кроме соединений в металлизированных отверстиях; $\lambda_{\text{Б.р}}$, $\lambda_{\text{Б.в}}$ – базовые интенсивности отказов соединений, выполненных соответственно ручной пайкой и пайкой волной (таблица 2), $\lambda_{\text{Б.меж}}$ – базовая интенсивность отказов в зависимости от технологии пайки сквозных металлизированных отверстий (межсоединений), соответствующая верхнему уровню качества стандарта MIL-SPEC [1, с. 599; 2, с. 17-1]; N_1 , N_2 – количество межсоединений, пропаянных соответственно ручным способом и способом «пайка волной».

Таблица 2

Базовые (усреднённые) значения интенсивностей отказов, соединений пайкой припоём [2, с. 599]

Вид соединения	Значение интенсивности отказов, 1/ч
Ручная пайка без накрутки	$\lambda_{\text{Б.р}} = 0,0013 \cdot 10^{-6}$
Пайка волной	$\lambda_{\text{Б.в}} = 0,000069 \cdot 10^{-6}$

Рекомендуемые справочником [2, с. 601] базовые интенсивности отказов в зависимости от технологии пайки межсоединений: печатный монтаж – $\lambda_{\text{Б.меж}} = 0,000017 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; использование навесных проводников (в случае $l \leq 2$) – $\lambda_{\text{Б.меж}} = 0,00011 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Уровень качества MIL-SPEC соответствует отечественной приёмке «5» (общее военное применение – ОВП, ВП), для которой коэффициент приёмки принят равным $K_{\text{п}} = 1$ [1, 2].

Отметим, что при определении вероятности безотказной работы печатной платы по её эксплуатационной интенсивности отказов в качестве времени необходимо использовать не наработку, а интересующую календарную продолжительность, либо календарную продолжительность, в течение которой достигается заданная наработка. Объясняется это включением в модель (6) сомножителя вида (4).

Пример применения модели

Будем предполагать, что печатная плата входит в состав измерительной аппаратуры, используемой в условиях промышленного предприятия, при необходимости с переносом в нужные производственные помещения. На предприятии предусмотрена двухсменная работа, продолжительность смены составляет примерно 8 ч. Этапы эксплуатации измерительной аппаратуры:

- включение/выключение – один раз раза в начале каждой рабочей смены с понедельника по пятницу включительно;
- постоянная работа в течение каждой рабочей смены;
- бездействующий режим (хранение, ожидание) – ночью с понедельника по пятницу, круглосуточно по субботам и воскресеньям.

Данные о печатной плате: размеры: 20×16 см; количество соединений для элементов поверхностного монтажа – 110; количество соединений для элементов, использующих сквозной монтаж

через отверстия печатной платы – 338, в том числе количество монтажных отверстий, имеющих металлизацию – 12; количества слоёв печатной платы – 2; преимущественная ширина печатных проводников – 0,56 мм; средний перегрев воздуха вблизи печатной платы относительно наружного воздуха вокруг измерительной аппаратуры – $\Delta t_B = 17$ °С; перегрев наиболее нагруженного элемента на печатной плате $\Delta t_{max} = 20$ °С; технология выполнения соединений пайкой: для элементов, использующих сквозной монтаж через отверстия печатной платы и сквозные металлизированные отверстия, – пайка волной; для элементов поверхностного монтажа – ручная пайка.

Температурные режимы эксплуатации измерительной аппаратуры:

- включение утром в первую смену при среднегодовой температуре, которая для наземной стационарной аппаратуры, не защищённой от погодных условий, согласно [4, с. 17] может быть принята равной $t = +11$ °С;

- повторное включение во вторую смену при среднегодовой температуре $t = +21$ °С (считаем, что из-за работы электрического оборудования среднегодовая температура в помещениях в конце первой рабочей смены на 10 °С выше, нежели утром в самом начале рабочей смены);

- изменение средней температуры после выключения аппаратуры для режима хранения (бездействия) в ночное время с понедельника по пятницу – с +21 до +11 °С;

- среднее значение разницы дневной и ночной температур, наблюдаемое для климата Республики Беларусь, – $\Delta t = 7$ °С [5].

Описание годовых этапов работы (наработки) и годовых циклов эксплуатации аппаратуры с указанием найденных параметров приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Описание годовых этапов работы измерительной аппаратуры и годового соотношения наработки/хранения

Этап работы	1-й температурный этап		2-й температурный этап		Годовое соотношение наработки/хранения	
	$(t_{пп})_1, \text{°C}$	$\tau_1, \%$	$(t_{пп})_2, \text{°C}$	$\tau_2, \%$	$\tau_{вкл}, \%$	$\tau_{выкл}, \%$
Значение	33	23,8	38	23,8	47,7	52,3

Таблица 4

Описание годовых циклов этапов эксплуатации

Этап эксплуатации	Этап работы				Этап хранения (ночь, рабочие дни)		Этап хранения (суббота, воскресенье)	
	Первое включение утром в рабочие дни		Последующее включение во вторую смену в рабочие дни		n_3	$\Delta t_3, \text{°C/цикл}$	n_4	$\Delta t_3, \text{°C/цикл}$
Параметр цикла	n_1	$\Delta t_1, \text{°C/цикл}$	n_2	$\Delta t_2, \text{°C/цикл}$	n_3	$\Delta t_3, \text{°C/цикл}$	n_4	$\Delta t_3, \text{°C/цикл}$
Значение	261	23	261	18	261	10	104	7

В таблице 5 приводятся параметры модели прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов печатной платы.

Таблица 5

Параметры и коэффициенты модели прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов печатной платы

Параметр, коэффициент	Значение	Номер формулы	Примечание
$K_Э$	2	–	Переносная аппаратура, используемая в режиме стационарного применения в любых помещениях [1, с. 37]
$K_{П}$	1	–	Приёмка «5» [1, с. 40]
$K_{сл}$	1	(7)	Число слоёв $l = 2$
N_{Σ}	338	–	Включая 12 металлизированных отверстий
$N_{пов}$	110	–	–
$N_{отв}$	338	–	–
$N_{пр}$	224	(8)	–
$S, \text{см}^2$	320	–	Размер платы 20×16 см

$K_{ш}$	1	–	Таблица 1, $b = 0,56$ мм
m	2	–	Этапы работы
$(K_t)_1$	1,06	(9)	$(t_{пп})_1 = 33$ °С
$(K_t)_2$	1,16	(9)	$(t_{пп})_2 = 38$ °С
n_1	261	–	Включение утром в первую смену (рабочие дни)
n_2	261	–	Включение во вторую смену (рабочие дни)
n_3	261	–	Режим бездействия ночью в рабочие дни
n_4	104	–	Режим бездействия в выходные дни
$(K_{ц})_1$	68,65	(10)	$\Delta t_1 = 23$ °С
$(K_{ц})_2$	68,65	(10)	$\Delta t_2 = 18$ °С
$(K_{ц})_3$	68,65	(10)	$\Delta t_3 = 10$ °С
$(K_{ц})_4$	34,12	(10)	$\Delta t_4 = 7$ °С
N_p	110	–	$N_p = N_{пов}$
N_v	326	–	$N_v = N_{отв} - 12$
$\lambda_{б,р}$, 1/ч	$0,0013 \cdot 10^{-6}$	–	Таблица 2
$\lambda_{б,в}$, 1/ч	$0,000069 \cdot 10^{-6}$	–	Таблица 2
N_2	12	–	–
$\lambda_{б,меж}$, 1/ч	$0,000017 \cdot 10^{-6}$	–	–

Используя таблицу 5, по модели (6) с учётом формулы (11) получаем значение эксплуатационной интенсивности отказов печатной платы ($\lambda_{э,пп}$), включая печатные проводники, паяные соединения и металлизированных отверстия:

$$\lambda_{э,пп} \approx 0,997 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Вероятность безотказной работы печатной платы $P(t)$ за интересующий календарный период t можно определить в предположении экспоненциального распределения времени до отказа. Например, для календарной продолжительности один год ($t = 8760$ ч) получим

$$P(t) = \exp(-\lambda_{э,пп} \cdot t) = \exp(-0,997 \cdot 10^{-6} \cdot 8760) \approx 0,9913.$$

С учётом годового соотношения наработки / хранения $\tau_{вкл}$, указанного в таблице 3, наработка t_n печатной платы за один календарный год составит

$$t_n = t \cdot \frac{\tau_{вкл}}{100} = 8760 \cdot \frac{47,7}{100} \approx 4180 \text{ ч.}$$

Выполним расчёт показателей надёжности рассмотренной печатной платы, используя методы, описанные в справочнике [2, с. 599-601]. В качестве наработки примем значение $t_n = 4180$ ч, соответствующее одному календарному году с учётом интенсивности использования аппаратуры в рассмотренном примере. Результаты расчёта с использованием моделей справочника [2]:

$$\lambda_{э,пп} \approx 0,337 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч, } P(t_n) = 0,9986.$$

При использовании методов расчёта, описанных в справочнике [2], эксплуатационная интенсивность отказов печатной платы с учётом пропаянных соединений и металлизированных отверстий приняла значение примерно в три раза меньшее, нежели с использованием предложенной

модели, что привело к завышенному значению вероятности безотказной работы печатной платы $P(t_n)$ для интересующей наработки: 0,9913 – по предлагаемой модели, 0,9986 – по моделям справочника [2].

Вывод

Расчёт надёжности печатной платы по предложенной модели в общем случае обеспечивает более достоверные показатели надёжности. Объясняется это тем, что предлагаемая модель учитывает дополнительно факторы, которые не принимаются во внимание моделями, приводимыми в справочниках [2, 6]: размер печатной платы; количество и преобладающая ширина печатных проводников; циклический характер работы электронного устройства, в котором используется печатная плата; температурные изменения, которым подвергается печатная плата при её работе и при хранении, и обусловленные этим термомеханические напряжения, возникающие в плате и соединениях.

Список литературы

1. Боровиков С. М., Цырельчук И. Н., Троян Ф. Д. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств. Минск: БГУИР. 2010. 68 с.
2. Прытков С. Ф. Надёжность электрорадиоизделий: справочник / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов. М.: ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ». 2008. 641 с.
3. Состав и общие правила задания требований по надёжности. ГОСТ 27.003–90. М.: Изд-во стандартов. 1991. 27 с.
4. 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.
5. Climate conditions in Belarus [Electronic resource]. Available at: <http://hikersbay.com/climate-conditions/belarus/climate-conditions-in-belarus.html?lang=en> (Date of access: 02.07.2021).
6. Reliability prediction of electronic equipment: Military Handbook MIL–HDBK-217F, Notice 2. Washington. Department of defense DC 20301. 1995, 205 p.

References:

1. Borovikov S. M., Tsyrelchuk I. N., Troyan F. D. Calculation of indicators of reliability of radio-electronic means. Minsk. BGUIR. 2010, 68 p. (in Russian).
2. Prytkov S. F., Gorbacheva V. M., Borisov A. A. Reliability of electrical radio products, 2006: reference book. Moscow. Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie "22 Central'nyj nauchno-issledovatel'skij ispytatel'nyj institut Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii". 2008, 641 p. (in Russian).
3. Composition and general rules for setting reliability requirements. GOST 27.003–90. Moscow. Izdatel'stvo standartov. 1991, 27 p. (in Russian).
4. 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.
5. Climate conditions in Belarus [Electronic resource]. Available at: <http://hikersbay.com/climate-conditions/belarus/climate-conditions-in-belarus.html?lang=en> (accessed 02.07.2021).
6. Reliability prediction of electronic equipment: Military Handbook MIL–HDBK-217F, Notice 2. Washington. Department of defense DC 20301. 1995, 205 p.