

УДК 621.382.019.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМЫ АРИОН

С.М. БОРОВИКОВ, Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ, В.Е. МАТЮШКОВ, И.Н. ЦЫРЕЛЬЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 14 апреля 2011

Приводятся предпосылки, положенные в основу разработки методики прогнозирования надежности электронных устройств. Методика использована при создании системы АРИОН, предназначенной для автоматизированного расчета надежности. Предлагаются модели прогнозирования, позволяющие определить эксплуатационную интенсивность отказов элементов производства стран СНГ. На основе анализа зарубежных (Россия, США, Китай) справочников и стандартов по прогнозированию надежности электронной аппаратуры предложена новая классификация наземной аппаратуры по условиям ее эксплуатации. Эта классификация заложена в расчетный модуль системы АРИОН. Для различных классов и групп элементов с учетом новой классификации получены усредненные значения поправочного коэффициента, учитывающего жесткость условий эксплуатации.

Ключевые слова: электронные устройства, автоматизированный расчет показателей надежности, методика прогнозирования, эксплуатационная интенсивность отказов элементов, поправочные коэффициенты, классификация аппаратуры по условиям эксплуатации.

Введение

Оценка показателей надежности электронных устройств на этапе проектирования аппаратуры является актуальной задачей. Она дает ответ на вопрос о целесообразности дальнейших затрат, необходимых на отработку технологии и производство устройств [1].

В недалеком прошлом проектные и промышленные предприятия Республики Беларусь испытывали трудности при расчете показателей надежности электронных устройств из-за неполноты данных о показателях надежности элементов производства стран СНГ, ограниченности данных об элементах зарубежного производства, входящих в состав электронных устройств, а также из-за отсутствия адаптированной к этим случаям системы автоматизированного расчета показателей надежности устройств. Поэтому актуальным являлось создание отечественной системы автоматизированного расчета, которая, с одной стороны, – позволила бы существенно сократить время для поиска справочной информации о надежности элементов и время решения задачи по оценке надежности электронных устройств в целом, с другой стороны, повысила бы престиж республики как страны, являющейся одним из лидеров широкого внедрения информационных технологий в проектирование электронной аппаратуры. Такая система была разработана в БГУИР в рамках выполнения инновационного проекта ГКНТ и получила название системы АРИОН [2, 3].

Система АРИОН (аббревиатура наименования «система Автоматизированного Расчета и Обеспечения Надежности электронных устройств») была разработана как белорусский вариант подобных российских систем АСОНИКА-Б, АСРН, зарубежных систем RELEX[®], ReliaSoft Office Lambda Predict[®], RAM Commander и др. [4]. Представляет собой высокотехнологичный программный комплекс для ЭВМ, предназначенный для автоматизированного расчета показателей надежности электронных устройств, имеет некоторые функции, не реализованные в зарубежных системах.

При разработке структуры системы АРИОН и выделении ее функциональных блоков, а в рамках блоков – модулей, решающих конкретные задачи, учитывалась необходимость эффективного обмена информацией, в том числе получаемой из базы данных, возможность редактирования базы данных, а также получение пользователем удобств в использовании системы и отображении результатов расчета надежности электронных устройств (рис. 1).

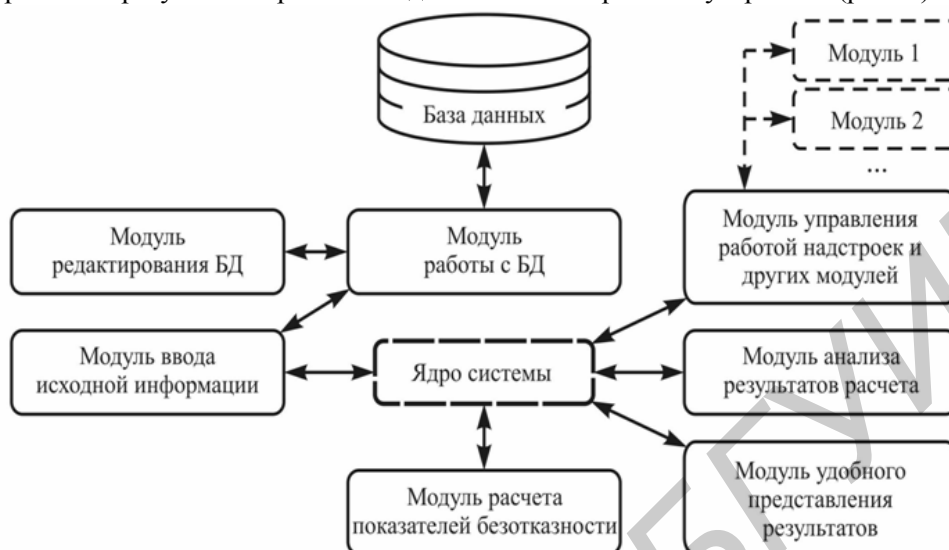


Рис. 1. Структурная схема основных составляющих системы АРИОН

Прогнозирование эксплуатационной безотказности элементов и электронного устройства в целом обеспечивает модуль расчета показателей безотказности, в основу работы которого положена методика, разработанная с учетом мирового опыта и наличия в составе устройств элементов как производства стран СНГ, так и иностранного производства. От совершенства методики во многом зависит достоверность показателей безотказности рассматриваемого электронного устройства, т.е. степень близости прогнозных показателей тем значениям, которые будут иметь место при реальной эксплуатации устройств. Поэтому разработке методики расчета надежности было уделено особое внимание [2, 3].

Предпосылки, принятые при разработке методики

При разработке методики прогнозирования, используемой для оценки показателей надежности электронных устройств, были приняты следующие предпосылки [2, 3].

Прогнозирование показателей надежности электронных устройств для заданных условий эксплуатации должно выполняться расчетным способом, основываясь на прогнозных эксплуатационных показателях надежности элементов, которые также должны определяться расчетным способом.

Уровень функциональной сложности электронных изделий – радиоэлектронные функциональные узлы и радиоэлектронные устройства согласно ГОСТ 26632–85 [5], выполненные с использованием печатного или навесного монтажа. Номенклатура прогнозируемых показателей надежности – показатели безотказности согласно ГОСТ 27.002–89 [6] в режиме работы электронных устройств:

- наработка на отказ T_0 (для восстанавливаемых электронных устройств);
- среднее время безотказной работы $T_{ср}$;
- гамма-процентная наработка до отказа T_γ при заданном значении γ ;
- вероятность безотказной работы в течение заданного времени t , $P(t)$.

В качестве прогнозных показателей безотказности элементов выбраны их эксплуатационные интенсивности отказов $\lambda_э$, рассчитываемые по математическим моделям, основываясь на исходных (справочных) значениях интенсивностей отказов, электрическом режиме, условиях эксплуатации, конструктивно-технологических и других особенностях элементов.

В качестве справочных интенсивностей отказов элементов выбраны обобщенные (другими словами – базовые) значения интенсивностей отказов $\lambda_б$ группы элементов. Значения $\lambda_б$ соот-

ветствуют группам элементов, объединенных по функциональному назначению, сходной технологии производства, близкому конструкционному исполнению и (или) применяемым материалам.

Значения $\lambda_{\text{Б}}$ учитывают все виды отказов [7], отвечают номинальному электрическому режиму и лабораторным условиям работы (температура окружающей среды $t_{\text{окр}} = +25 \text{ }^\circ\text{C}$) [8, 9]. Значения $\lambda_{\text{Б}}$ принимаются постоянными в течение заданной наработки, что соответствует гипотезе об экспоненциальном распределении наработки до отказа элементов [1, 9].

Прогнозирование эксплуатационной надежности элементов производства стран СНГ

Значения эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_{\text{Э}}$ большинства групп элементов (компонентов) электронных устройств прогнозируются расчетным способом с использованием математической модели [1, 8, 9]

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{Б}}$ – базовая интенсивность отказов данной группы элементов в целом; K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; m – число учитываемых факторов.

Для отдельных групп сложных электрорадиоизделий (ЭРИ), суммарный поток отказов которых складывается из независимых потоков отказов составных частей ЭРИ (например, электромагнитной катушки и контактной системы реле), предложено использовать математическую модель расчета эксплуатационной интенсивности отказов в виде

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б1}} \prod_{i=1}^{m_1} K_i^{(1)} + \dots + \lambda_{\text{Бn}} \prod_{i=1}^{m_n} K_i^{(n)}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{Б}j}$ – базовая интенсивность отказов j -й части изделия, $j = 1, \dots, n$; n – количество составных частей изделия; $K_i^{(j)}$ – коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора для j -й части изделия; $i = 1, \dots, m_j$; $j = 1, \dots, n$; m_j – количество факторов, учитываемых для j -й части изделия.

Формула (2) учитывает тот факт, что разные части (компоненты) ЭРИ могут иметь различные значения коэффициентов, учитывающих влияние одного и того же фактора, в частности, уровня качества изготовления в условиях производства (вид приемки, учитывается коэффициентом $K_{\text{П}}$). Например, электромагнитная катушка реле может изготавливаться с уровнем качества, определяемым приемкой «1», на одном предприятии, а контактная система и сборка реле в целом могут выполняться с приемкой «3» – на другом предприятии.

Конкретная запись модели для группы элементов зависит также от конструктивных особенностей элементов и количества задействованных частей (например, контактов в случае коммутационных изделий или соединителей).

Прогнозирование эксплуатационной интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{Э}i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) выполняют расчетным методом, используя математические модели, вид которых зависит от класса и группы элементов. Например, для интегральных микросхем (ИМС), работающих в типовом (номинальном) электрическом режиме

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_t K_{\text{ИМС}} K_{\text{МК}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{Б}}$ – базовая интенсивность отказов элементов данного класса или группы; K_i – поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора (нижние индексы означают: t – температура, ИМС – количество элементов в составе ИМС или количество бит для ИМС памяти или разрядность в битах для микропроцессоров, МК – материал корпуса ИМС, V – напряжение питания для КМОП ИМС, Э – жесткость условий эксплуатации, кроме температуры, которая учитывается отдельно, П – вид приемки элементов при изготовлении их в условиях производства). Подобные поправочные коэффициенты включают и математические модели, используемые для прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_{\text{Э}}$ других элементов.

Большинство моделей для разрабатываемой методики заимствовано из справочников [8, 9]. Используя табличные значения коэффициентов вида K_i [8, 9], входящих в эти модели, были получены аппроксимирующие аналитические выражения, включенные в методику, используемую системой АРИОН. Для интегральных микросхем, работающих в облегченных режимах, а также для элементов коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.), реле электромагнитных общего назначения, реле и автоматов защиты и трансформаторов были предложены новые модели прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов (табл. 1).

Таблица 1 Математические модели определения значений $\lambda_{\text{Э}}$

Класс (группа) элементов	Вид математической модели
Интегральные микросхемы (типовой электрический режим работы)	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_t K_{\text{ИМС}} K_{\text{МК}} K_{\text{V}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$
Элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	$\lambda_{\text{Э}} = (\lambda_{\text{Б}}^{(\text{к.и})} K_{\text{К}} K_{\text{F}} + \lambda_{\text{Б}}^{(\text{вкл})} NF) K_{\text{P}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$
Реле электромагнитные общего назначения	$\lambda_{\text{Э}} = (\lambda_{\text{Б}}^{(\text{L})} K_{\text{P}}^{(\text{L})} K_{\text{F}} K_{\text{П}}^{(\text{L})} + \lambda_{\text{Б}}^{(\text{ком})} FK_{\text{P}} K_{\text{К}} K_{\text{П}}) K_{\text{Э}}$
Реле и автоматы защиты	$\lambda_{\text{Э}} = (\lambda_{\text{Б}}^{(\text{L})} K_{\text{P}}^{(\text{L})} K_{\text{F}} K_{\text{П}}^{(\text{L})} + \lambda_{\text{Б}}^{(\text{ком})} FK_{\text{П}}) K_{\text{Э}}$
Трансформаторы	$\lambda_{\text{Э}} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_{\text{пр.}i} l_i K_{\text{T}i} K_{\text{d}i} + 2K_t \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{к.}i} K_{\text{d}i} \right) K_{\text{B}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$

В табл. 2 дается пояснение параметров моделей, приводимых в табл. 1.

Таблица 2 **Обозначения и пояснения параметров, входящих в математические модели**

Параметр	Пояснение
λ_B	Обобщенная (базовая) интенсивность отказов группы элементов, отвечающая температуре окружающей среды +25 °С и номинальной электрической нагрузке, т.е. значению коэффициента электрической нагрузки $K_H = 1$
$\lambda_{пр.i}$	Базовая интенсивность отказов провода i -й обмотки трансформатора
$\lambda_{к.i}$	Базовая интенсивность отказов точки заделки (монтажа) провода i -й обмотки трансформатора
K_P	Коэффициент режима работы, зависящий от электрической нагрузки (коэффициента K_H) и температуры корпуса элемента
K_t	Коэффициент, зависящий от температуры корпуса элемента (компонента)
$K_{Э}$	Коэффициент эксплуатации, зависящий от жесткости условий эксплуатации электронного устройства
$K_{П}$	Коэффициент приемки, учитывающий степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки элементов (компонентов) ЭУ в условиях производства
$K_{ИМС}$	Коэффициент, учитывающий количество элементов в ИМС или бит (для ИМС памяти)
$K_{МК}$	Коэффициент, учитывающий материал (тип) корпуса ИМС
K_V	Коэффициент, учитывающий напряжение питания для КМОП ИМС
K_K	Коэффициент, зависящий от количества задействованных контактов
K_F	Коэффициент, учитывающий число коммутаций в час
$\lambda_B^{(кн)}$	Базовая интенсивность отказов коммуникационного изделия в целом, 1/ч
$\lambda_B^{(вкл)}$	Дополнительная интенсивность отказов, приходящаяся на одно включение при работе коммуникационного изделия или реле в составе РЭА, 1/вкл.
L	Верхний индекс, означающий, что соответствующие величины относятся к электромагнитной катушке реле
$\lambda_B^{(ком)}$	Интенсивность отказов реле, приходящаяся на одну коммутацию
F	Средняя частота переключений или коммутации изделия в час при работе в составе электронного устройства
N	Количество активных контактов (контактирующих точек)
l_i	Длина провода i -й обмотки трансформатора
$K_{T i}$	Коэффициент, зависящий от рабочей температуры, материала и конструкции изоляции провода i -й обмотки трансформатора
$K_{d i}$	Коэффициент, зависящий от диаметра провода i -й обмотки трансформатора
K_B	Коэффициент, учитывающий вид трансформатора (звуковые, радиочастотные, импульсные, трансформаторы питания и т.д.)

Учет условий эксплуатации

Учет жесткости условий эксплуатации выполняется с помощью коэффициента эксплуатации $K_{Э}$. Для реализации в системе АРИОН процедуры выбора значений $K_{Э}$ авторами выполнена классификация групп наземной аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации. Сделано это путем анализа данных, приводимых в справочниках и стандартах по надежности, разработанных в России, США и Китае [8–12] (табл. 3).

Таблица 3. Предлагаемая классификация аппаратуры по условиям ее эксплуатации

Предлагаемое условное обозначение групп аппаратуры	Характеристика аппаратуры и условий ее эксплуатации	Примерное соответствие группам по документам других стран	
		ГОСТ РВ 20.39.304-98 (Россия)	MIL-HDBK-217F (США)
Н	Аппаратура, эксплуатируемая на земле (наземная аппаратура), общее обозначение	1	G
$N_{ИР}$	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая в лабораторных условиях, капитальных жилых помещениях, помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями	–	G_B
$N_{ЧР}$	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая в нерегулярно отапливаемых помещениях (объемах), в производственных, в том числе вентилируемых подземных помещениях (шахтах); возможно частичное регулирование климатических условий	1,1	G_B, G_{MS}
$N_{ОВ}$	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая под навесом или в неотапливаемых помещениях (объемах), где климатические условия близки к условиям открытого воздуха	1,2	G_F
$N_{ПС}$	Переносная аппаратура, эксплуатируемая в режиме стационарного применения в помещениях с регулируемыи, нерегулируемыми климатическими условиями или под навесом (в условиях эксплуатации аппаратуры групп $N_{ИР}$, $N_{ЧР}$ и $N_{ОВ}$)	1,1	G_F
$N_{МП}$	Мобильная аппаратура (носимая, подвижная), эксплуатируемая в любых помещениях, в том числе в палатках или на открытом воздухе	1,3–1,9	G_M
$N_{МД}$	Мобильная аппаратура, эксплуатируемая (в движении) на железнодорожном транспорте, а также в кузовах и салонах автомашин и других механических транспортных средств	1,3–1,9	G_M
Б	Аппаратура самолетов и вертолетов, эксплуатируемая в воздушном пространстве (бортовая аппаратура), общее обозначение	3	A
$B_{СК}$	Аппаратура грузовых и пассажирских самолетов, эксплуатируемая в отсеках (салонах, кабинах), где находятся люди	3.2	A_{IC}

В табл. 3 включена также одна из групп бортовой аппаратуры, эксплуатируемая на грузовых и пассажирских самолетах в отсеках (кабины, салоны), где находятся люди, близкая по условиям эксплуатации к наземной аппаратуре. В таблице указывается примерное соответствие выделенных групп аппаратуры военному стандарту России и справочнику по надежности США.

Определение группы аппаратуры, к которой относится проектируемое электронное устройство, должно производиться по табл. 3 в зависимости от функционального назначения и наиболее жестких условий при реальной эксплуатации устройства.

С учетом предложенной классификации групп аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации были получены усредненные (экстраполированные) значения коэффициента эксплуатации K_3 для различных классов и групп элементов (табл. 4). Усреднение значений K_3 сделано с использованием данных справочников по надежности ЭРИ [8, 9] с учетом военного справочника США MIL-HDBK-217F [11] и стандарта Китая GJB/z 299B [12]. Полученные значения K_3 включены в методику прогнозирования надежности электронных устройств. Система АРИОН, использующая разработанную методику, выбирает коэффициент K_3 в зависимости от группы аппаратуры, к которой в соответствии с классификацией отнесено исследуемое электронное устройство.

Таблица 4. Значения коэффициента эксплуатации $K_э$

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации						
	Н _{ир}	Н _{чр}	Н _{ов}	Н _{пс}	Н _{мп}	Н _{мд}	Б _{ск}
1. ИМС	1	1,2	1,5	1,7	2	3	3,5
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды, кроме диодов СВЧ	1	1,2	1,5	2	3	4	4
стабилитроны, ограничители напряжения	1	1,2	1,7	2,5	4	5	5
диоды СВЧ	1	1,2	1,3	1,5	2	2	3
транзисторы биполярные, кроме СВЧ	1	1,2	1,5	2	4	5	4
транзисторы биполярные СВЧ	1	1,2	2	2,5	4	5	5
транзисторы полевые, тиристоры	1	1,2	1,3	1,5	1,7	2	3
излучатели полупроводниковые (светодиоды), оптопары	1	1,1	1,3	1,5	2	2,5	6
фотодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы	1	1,1	1,5	2	3	4	6
3. Знакосинтезирующие индикаторы (вакуумные люминесцентные, вакуумные накаливаемые, газоразрядные, полупроводниковые)	1	1,1	1,3	1,5	2	2,5	6
4. Пьезоэлектрические приборы, электромеханические фильтры	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	2
5. Резисторы:							
постоянные непроволочные	1	1,2	1,5	2	3	5	6
постоянные проволочные и фольговые	1	1,2	1,5	2	3	5	10
переменные непроволочные	1	1,5	2	2,5	4	6	8
переменные проволочные	1	1,5	2	2,5	4	5	5
резисторные микросхемы, сборки	1	1,2	1,5	2	3	5	6
терморезисторы	1	1,2	1,5	2	3	5	6
6. Конденсаторы:							
керамические, стеклянные, слюдяные, тонкопленочные с неорганическим диэлектриком	1	1,1	1,3	1,5	3	5	4
с органическим диэлектриком, бумажные	1	1,2	1,3	1,5	3	5	4
оксидно-электролитические	1	1,2	1,5	2	3	5	5
оксидно-пористые	1	1,2	1,5	2	3	5	5
подстроечные	1	1,5	2	2,5	4	6	5
7. Трансформаторы	1	1,3	1,6	2	3	5	10
8. Дроссели, катушки индуктивности	1	1,3	1,6	2	3	5	10
9. Линии задержки	1	1,2	2	3	3	5	10
10. Коммутационные изделия:							
тумблеры, кнопки, переключатели кнопочные, галетные, программные и движковые, переключатели на базе герконов	1	1,5	2	2,5	2,7	3	5
микрпереключатели	1	1,7	2,5	3	4	5	10
контакты магнитоуправляемые	1	1,7	2,5	5	10	16	50
11. Соединители низкочастотные	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3
12. Соединители радиочастотные	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3
13. Реле:							
электромагнитные средней мощности и слаботочные	1	1,5	2,5	4	5	6	8
реле и автоматы защиты, выключатели и переключатели автоматические и т.п.	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	4
14. Электрические кабели, шнуры, провода	1	1	1,2	1,5	2	3	7
15. Соединения (пайка, сварка, скрутка, обжимка, опрессовка и т.д.)	1	1,2	1,7	2	3	4	5
16. Установочные изделия (предохранители, держатели предохранителей)	1	1,2	1,7	2	4	8	9
17. Прочие элементы:							
электронно-лучевые трубки	1	1	1,3	1,5	1,7	2	4
индикаторные лампочки	1	1,2	2	3	3,5	4,5	6

Заключение

При разработке методики прогнозирования надежности электронных устройств были уточнены модели прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов элементов различных классов и групп. Для некоторых групп элементов предложены новые модели, учитывающие конструктивные особенности и функционирование этих элементов. Использование этих моделей обеспечивает более достоверную оценку эксплуатационной надежности. Например, применительно к реле малой и средней мощности с использованием экспериментальных данных установлено [13], что достоверность оценки эксплуатационной интенсивности отказов почти в два раза выше, нежели по моделям, приводимым в справочниках [8, 9]. Предложена классификация наземной аппаратуры по условиям ее эксплуатации, являющаяся более широкой (6 групп), нежели приводимая в [8, 9, 11]. Гипотетически она должна также повысить достоверность оценки эксплуатационной надежности элементов. Получены усредненные значения коэффициента эксплуатации $K_э$ для различных классов и групп элементов. Уточненные и новые модели прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов, а также предложенная классификация наземной аппаратуры включены в методику прогнозирования электронных устройств. Сама методика использована для создания расчетного модуля системы АРИОН, позволяющей в интерактивном режиме работы с ЭВМ решать задачу оценки надежности электронных устройств в целом.

CREATION OF RELIABILITY PREDICTION METHOD FOR ELECTRONIC DEVICES IN THE SYSTEM OF SOARC

S.M. BOROVIKOV, E.N. SHNEIDEROV, V.E. MATYUSHKOV, I.N. TSYRELCHUK

Abstract

The basic premises of creation of reliability prediction method for electronic devices are described. The method is used for developing of System of Automatic Reliability Calculation SoARC. The prediction models which make it possible to estimate exploitation failure rate of elements manufactured at CIS are considered. A new classification of the ground equipment under the terms of its operation based on the analysis of foreign (Russia, USA, China) guides and standards for reliability prediction of electronic equipment were proposed. This classification was built into the calculation module of the SoARC system. Averaged values of the correction factor that takes into account the rigidity of operating conditions for various classes and groups of elements into consideration the new classification were obtained.

Литература

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Мн., 1998.
2. Боровиков С.М., Аваков С.М., Цырельчук И.Н. и др. // XIV Международ. науч.-техн. конф. 2009. С. 58.
3. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Аваков С.М. и др. // Международ. науч.-практ. конф. 2010. С. 175–177.
4. Строгонов А., Жаднов В., Полесский С. Компоненты и технологии. 2007. №5. С. 183–190.
5. ГОСТ 26632–85 Термины и определения. М., 1986.
6. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М., 1990.
7. European Organization of the Quality Control Glossary. Bern., 1988.
8. Надежность ИЭТ для устройств народнохозяйственного назначения. М., 1990.
9. Надежность электрорадиоизделий. М., 2008.
10. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. М., 1999.
11. Reliability prediction of electronic equipment: Military Handbook MIL–HDBK-217F. 1995.
12. Reliability prediction model for electronic equipment: The Chinese Military.
13. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Журов П.А. и др. // Технические средства защиты информации. 2010. С. 69.