

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396+629.78-192

МОДЕЛЬ И МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Быков Алексей Петрович

аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва¹;

ведущий инженер по испытаниям АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»².

E-mail: bykgal@yandex.ru

¹Адрес: 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

²Адрес: 443009, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 18.

Аннотация: Важным звеном проектирования бортовых устройств является расчёт и оценка их надёжности. Для этого используются прогнозные, структурные или физические методы. Однако используемые методики не в полной мере учитывают физические условия эксплуатации изделий, что снижает точность и достоверность результатов расчёта и оценки надёжности. Это обуславливает актуальность работ по исследованию и апробации новых моделей и методов оценки. Целью работы является повышение точности и достоверности оценки надёжности радиоэлектронных устройств космических аппаратов. В качестве объекта исследования был использован микропроцессорный контроллер температуры. Была предложена структурная модель оценки надёжности радиоэлектронных устройств космических аппаратов. При этом была использована процедура разбиения электрической схемы на «одинаковые» по условиям и времени работы части с учётом индексов приёмки, коэффициентов нагрузочной способности и диагностического контроля. На основе этой модели предложен новый метод расчёта и оценки надёжности. Оценку проводят поэтапно: предварительный расчёт с учётом индексов приёмки и коэффициента организационно-технических мероприятий на конкретном предприятии; промежуточный — по результатам автономных или комплексных испытаний, что позволяет учитывать данные индивидуального прогнозирования; окончательная оценка — по результатам лётных испытаний. Приведён пример расчёта вероятности безотказной работы одного канала прибора. Предложенные модель и метод прошли апробацию. Она показала хорошие результаты.

Ключевые слова: надёжность, радиоэлектронные устройства, модель, метод, расчёт, вероятность безотказной работы.

Введение

К числу основных требований, предъявляемых к радиотехническим и электронным системам космических аппаратов, относится требование высокой надёжности, в первую очередь безотказности и долговечности [1]. Кроме того, такие системы должны иметь оптимальную структуру [2].

Разработка бортовой аппаратуры (БА) представляет собой итерационный процесс поиска оптимального решения с точки зрения требуемого качества изделия в условиях накладываемых ограничений. Поэтому этап проектирования имеет особую важность, т.к.

именно на этом этапе закладывается та надёжность, которая будет реализована на последующих этапах жизненного цикла изделия. В связи с этим важным звеном проектирования бортовых приборов является расчёт их надёжности. Под расчётом надёжности понимают процедуру определения значений показателей по справочным данным о надёжности элементов объекта, по данным о надёжности изделий-аналогов, по свойствам применяемых в изделии материалов и другой исходной информации [3].

При этом используются прогнозные, структурные или физические методы расчёта. Они

базируются на известных математических моделях. Разработан ряд конкретных методик. Например, в работе [4] приведена методика расчёта надёжности радиоэлектронных средств на основе оценки надёжности электронной компонентной базы. Выполнен расчёт базовых значений интенсивности отказов трёх типов микросхем одинакового функционального назначения, но разных производителей. При расчёте использовались данные справочников [5, 6]. Однако эти методики не в полной мере учитывают физические условия эксплуатации.

В связи с этим была поставлена задача разработки и апробации новой модели и метода оценки надёжности бортовых радиоэлектронных устройств.

В качестве исследуемого устройства использовали микропроцессорный контроллер температуры (МКТ).

Назначение прибора

Прибор МКТ состоит из трёх одинаковых независимых каналов А, В, С и предназначен для управления агрегатами системы терморегулирования (СТР) космического аппарата (КА) при штатной работе и при испытаниях КА, а также при испытаниях и штатной эксплуатации СТР.

Каждый канал прибора МКТ предназначен для:

- 1) съёма информации с 36 температурных датчиков СТР;
- 2) выдачи 52 команд управления (КУ);
- 3) приёма сигналов «Прерывание», «Сброс» и команд «ВКЛПИТ», «ОТКЛПИТ», «ПЗУ», «РПЗУ», «ВКЛОУ», и «ОТКЛОУ»;
- 4) приёма в один адрес восьмиразрядного параллельного кода и сигнала «1 Гц» с уровнями от 4,2 до 5,5 В для «лог. 1» и не более 0,4 В для «лог. 0» на активной нагрузке 24 кОм;
- 5) приёма 6 аналоговых сигналов;
- 6) обработки 20 контактных датчиков;
- 7) измерения 4-х трёхвыводных переменных резисторов с сопротивлением от 0 до 4,7 кОм;

- 8) выдачи тактовых импульсов (ТИ) с частотой $(25 \pm 2,5)$ Гц на 12 выходов прибора, шесть из которых с возможностью увеличения и уменьшения частоты в два и четыре раза;

- 9) обеспечения информационного обмена по мультиплексному каналу обмена (МКО);

- 10) для выдачи телеметрических параметров в систему телеметрического контроля.

Модель оценки надёжности

Был проведён структурный анализ исследуемого изделия. Для оценки надёжности прибора была предложена структурная модель следующего вида (рис. 1). В ней выделены три канала основных модулей устройства. Модули реализуют структурные схемы надёжности (ССН). Каждая ССН прибора была составлена по результатам анализа схем электрических принципиальных его модулей.

Был использован метод разбиения на «одинаковые» части по условиям и времени работы с учетом индексов приёмки, коэффициентов нагрузочной способности [7] и диагностического контроля [8]. На рис. 2 приведена развёрнутая ССН одного канала. На ней все модули разбиты на составные части. Каждая составная часть объединяет электрорадиоизделия (ЭРИ), работающие в штатном режиме одинаковое время и находящиеся в одинаковых условиях эксплуатации (хранения, ожидания). Такой подход позволил использовать автоматизированную систему расчёта надёжности, что сократило расчётное время.

Так, узел А12.1 модуля вторичного источника питания (ВИП) объединяет ЭРИ, работающие 43800 ч в режиме эксплуатации; узел А12.2 объединяет ЭРИ, работающие при подаче на прибор команд (не более 50) и находящиеся практически в режиме ожидания; узел А12.3 содержит ЭРИ, работающие при подаче команд «ВКЛ» и «ОТКЛ» в режиме эксплуатации не более 1 ч и в режиме ожидания 43799 ч; в узел А12.4 входят ЭРИ, работающие при включенном адаптере мультиплексного канала обмена (АМКО) в течение 61 ч в режиме эксплуатации и 43739 ч в режиме ожидания.

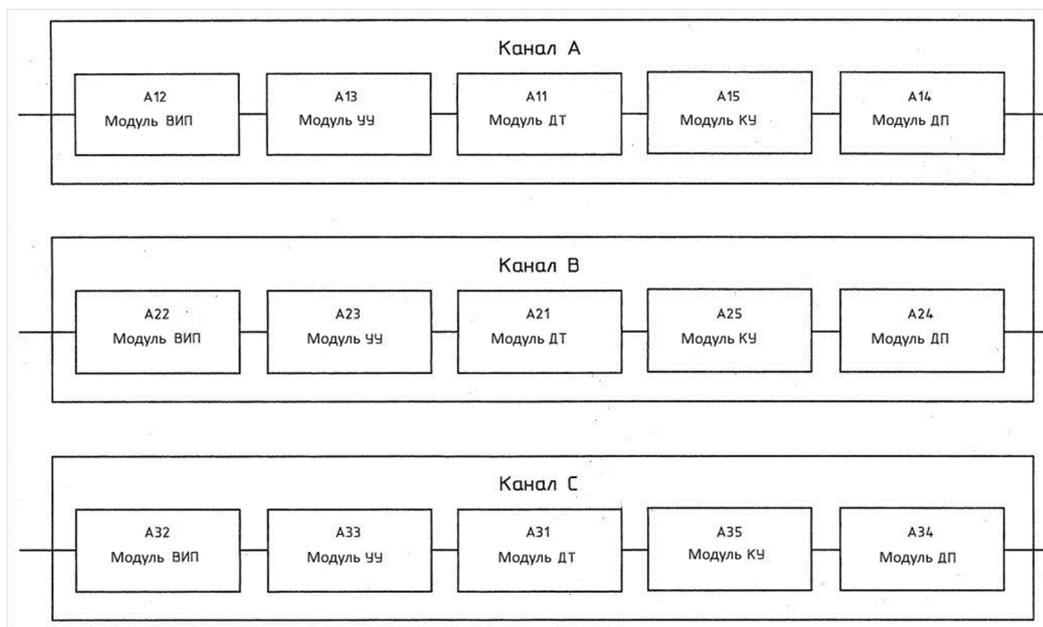


Рис. 1. Структурная модель надёжности прибора

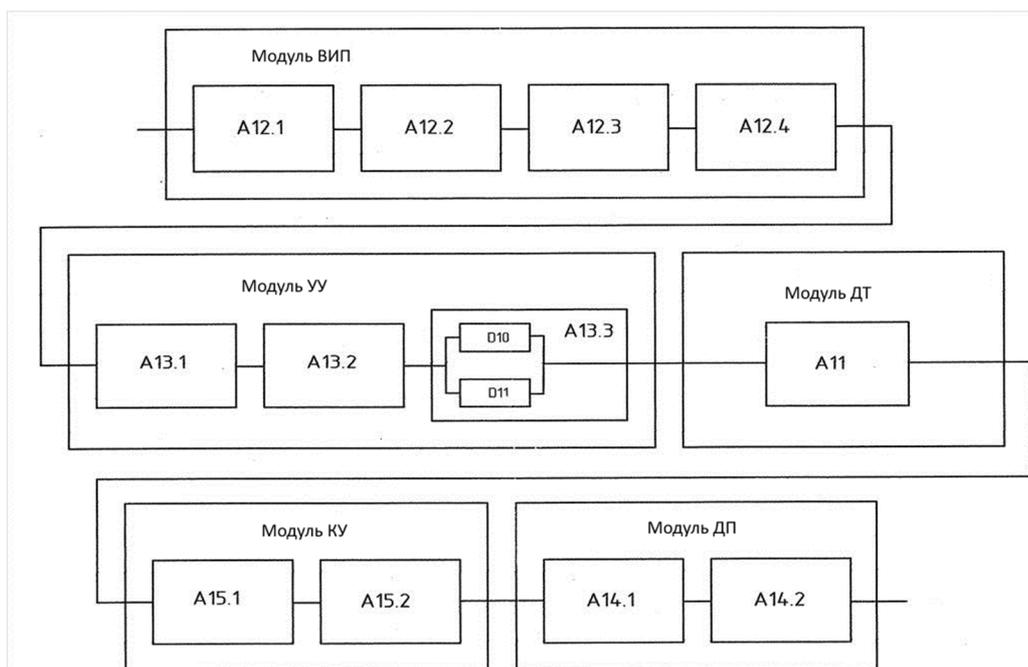


Рис. 2. Структурная модель надёжности канала А прибора

Модуль устройства управления (УУ) содержит узлы А13.1, А13.2, А13.3. Узел А13.1 объединяет ЭРИ, работающие в течение 43800 ч в режиме эксплуатации; в узел А13.2 входят ЭРИ, работающие при включенном АМКО в течение 61 ч в режиме эксплуатации

и 43739 ч — в режиме ожидания; узел А13.3 содержит ЭРИ, работающие в режиме горячего резерва в течение 43800 ч.

Модуль датчиков температуры (ДТ) содержит узел А11, все ЭРИ которого работают в режиме эксплуатации в течение 43800 ч.

В состав модуля команд управления (КУ) входят два узла — А15.1 и А15.2. Все ЭРИ узла А15.1 работают в режиме эксплуатации в течение 43800 ч. ЭРИ узла А15.2 находятся 50% времени штатной работы в режиме эксплуатации и столько же — в режиме ожидания.

ЭРИ узла А14.1 модуля формирования мажорированных тактовых импульсов и опроса датчиков (ДП) работают в течение 43800 ч в режиме эксплуатации, а узла А14.2 — в режиме эксплуатации (10950 ч) и ожидания (32850 ч).

Расчет надёжности

Оценку надёжности предлагается проводить поэтапно: предварительный расчёт с учётом коэффициента организационно-технических мероприятий на конкретном предприятии; промежуточный — по результатам автономных или комплексных испытаний, что позволяет учитывать данные индивидуального прогнозирования [9]; окончательная оценка — по результатам лёгких испытаний.

В качестве примера рассмотрим предварительный расчёт вероятности безотказной работы одного из каналов прибора. Примем, что время штатной работы прибора составляет 5 лет, требуемая вероятность безотказной работы одного канала составляет 0,96. В соответствии с предложенной моделью ССН прибора представляет собой ряд последовательно соединённых элементарных структурных моделей (схем) надёжности (ЭССН). Следовательно, мы можем ЭССН считать типовой ССН, которая известна в теории надёжности [10, 11]. Будем считать, что для них известны основные выражения зависимостей их показателей надёжности от надёжностных характеристик составляющих элементов.

Тогда, в качестве показателя надёжности для нерезервированного устройства можно принять вероятность безотказной работы на определённом интервале времени $P(T_{ш,р})$ при допущении, что вероятность возникновения отказов элементов устройства во времени рас-

пределена по экспоненциальному закону и описывается формулой [12]:

$$P = e^{-K_A \cdot K_{ИТЦ} \cdot K_{ИИ} \cdot \sum_{i=1}^N (\lambda_{ЭИ} \cdot T_{ш,р} + \lambda_{ЭО} \cdot T_{ш,х})}, \quad (1)$$

где $\lambda_{ЭИ}$ — расчётная эксплуатационная интенсивность отказов i -го элемента, $ч^{-1}$; $T_{ш,р}$ — время штатной работы элемента, $ч$; $\lambda_{ЭО}$ — расчётная интенсивность отказов i -го элемента в режиме ожидания (хранения) в обесточенном состоянии, $ч^{-1}$; $T_{ш,х}$ — время нахождения элемента в обесточенном состоянии, $ч$; N — количество элементов; K_A — коэффициент качества производства аппаратуры, характеризующий отработанность техпроцесса и уровень организации производства ($K_A = 0,2$); $K_{ИТЦ}$ — коэффициент, учитывающий изменение за счёт проведения дополнительных испытаний ЭРИ в испытательном техническом центре ($K_{ИТЦ} = 0,1$); $K_{ИИ}$ — коэффициент ионизирующих излучений ($K_{ИИ} = 1$).

Хранение прибора в наземных условиях при расчёте вероятности безотказной работы учитывать не будем, так как перед штатной эксплуатацией проверяется его работоспособность в составе изделия.

В этом случае значения эксплуатационной интенсивности отказов можно рассчитать по формуле:

$$\lambda_{ЭИ} = \lambda_{\delta}(\lambda_{\delta,c,c}) \cdot \prod_{i=1}^m K_i, \quad (2)$$

где $\lambda_{\delta}(\lambda_{\delta,c,c})$ — исходная (базовая) интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ в условиях номинальной электрической нагрузки при температуре окружающей среды 25 °С; K_i — коэффициенты, учитывающие изменение исходной интенсивности отказов от различных факторов; m — число учитываемых факторов.

При расчёте различные факторы влияния будем учитывать следующие коэффициентами: K_s — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации, при условии, что прибор относится к группе 5.3; K_p — коэффициент, учитывающий фактический режим применения ЭРИ в аппаратуре (электрической нагрузки и температуры); $K_{ПР}$ — коэффициент приёмки;

K_{kk} — коэффициент, зависящий от количества задействованных контактов соединителя; K_{kc} — коэффициент, зависящий от количества сочленений-расчленений соединителя; K_{ϕ} — коэффициент, зависящий от функционального назначения полупроводниковых ЭРИ; K_S — коэффициент, зависящий от величины рабочего напряжения относительно максимально допустимого по ТУ на ЭРИ; K_C — коэффициент, зависящий от величины номинальной ёмкости; K_{CT} — коэффициент, зависящий от сложности интегральных микросхем и температуры окружающей среды; K_V — коэффициент, зависящий от максимального напряжения питания интегральных микросхем; $K_{КОРП}$ — коэффициент, учитывающий вид корпуса интегральных микросхем; K_R — коэффициент, зависящий от величины номинала сопротивления резистора; K_M — коэффициент, зависящий от величины номинальной мощности для металлодиэлектрических резисторов; $K_{СТАБ}$ — коэффициент, зависящий от допуска на номинал сопротивления резистора; N_2 — количество паек печатного монтажа, выполняемого вручную; K_c — коэффициент, зависящий от количества слоёв в печатной плате; $K_{ТХ}$ — коэффициент, учитывающий изменение $\lambda_{ТХ}$ в зависимости от температуры окружающей среды.

При расчёте будем использовать коэффициенты электрических нагрузок ЭРИ, приведённые в ТУ. Расчёт проведём для температуры окружающей среды 40 °С.

В этом случае вероятность безотказной работы прибора МКТ равна:

$$P_{\text{мкт}}^{\text{канал}} = P_{\text{вин}} \cdot P_{\text{уу}} \cdot P_{\text{от}} \cdot P_{\text{ку}} \cdot P_{\text{оп}} \quad (3)$$

Для расчёта $P_{\text{мкт}}^{\text{канал}}$ необходимо рассчитать вероятности безотказной работы составных частей канала.

Вероятность безотказной работы модуля (платы) ВИП равна:

$$P_{\text{ВИП}} = e^{-0,2 \cdot 0,1 (\lambda_3^{4,1} T_3^{4,1} + \lambda_{3X}^{4,2} T_{3X}^{4,2} + \lambda_3^{4,2,3} T_3^{4,2,3} + \lambda_{3X}^{4,2,3} T_{3X}^{4,2,3})} \times e^{-0,2 \cdot 0,1 (\lambda_3^{4,2,4} T_3^{4,2,4} + \lambda_{3X}^{4,2,4} T_{3X}^{4,2,4})} = 0,99831076. \quad (4)$$

Вероятность безотказной работы узла А13.3 равна:

$$P_{\text{А13.3}} = e^{-0,2 \cdot 0,1 \lambda_3^{4,3,3} T_3^{4,3,3}} = 0,9997366. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы узла А13.3 с учётом резервирования равна

$$P_{\text{А13.3}}^{\text{рез}} = 0,9999993062. \quad (6)$$

Вероятность безотказной работы модуля (платы) УУ равна:

$$P_{\text{УУ}} = e^{-0,2 \cdot 0,1 (\lambda_3^{4,3,1} T_3^{4,3,1} + \lambda_{3X}^{4,3,2} T_{3X}^{4,3,2} + \lambda_3^{4,3,2} T_3^{4,3,2})} \times P_{\text{А13.3}}^{\text{рез}} = 0,9971589. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы модуля (платы) ДТ будет равна:

$$P_{\text{ВИП}} = e^{-0,2 \cdot 0,1 \lambda_3^{4,1} T_3^{4,1}} = 0,995412. \quad (8)$$

Вероятность безотказной работы модуля (платы) КУ равна:

$$P_{\text{КУ}} = e^{-0,2 \cdot 0,1 (\lambda_3^{4,5,1} T_3^{4,5,1} + \lambda_{3X}^{4,5,2} T_{3X}^{4,5,2} + \lambda_3^{4,5,2} T_3^{4,5,2})} = 0,9845068. \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы модуля (платы) ДП равна:

$$P_{\text{ДП}} = e^{-0,2 \cdot 0,1 (\lambda_3^{4,4,1} T_3^{4,4,1} + \lambda_{3X}^{4,4,2} T_{3X}^{4,4,2} + \lambda_3^{4,4,2} T_3^{4,4,2})} = 0,9944346. \quad (10)$$

В итоге, вероятность безотказной работы одного канала прибора МКТ равна:

$$P_{\text{мкт}}^{\text{канал}} = 0,9701255. \quad (11)$$

Промежуточный этап оценки надёжности будет выполнен после завершения автономных испытаний [13–19]. Эти результаты будут приведены в следующей статье.

Литература

1. Иванов В.А. Функциональная устойчивость систем. Новое видение системной проблемы // Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика: Тез. докл. 2-ой междуна. НТК. Рязань, 1998. С. 76–78.
2. Кузнецов А.С., Кузнецов С.Н., Ушкар М.Н. Методика выбора оптимальной структуры РЭС // Электросвязь. 2016. № 11. С.52–56.
3. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 1996. 16 с.
4. Stolbinsky D.V., Denisyuk A.A., Piganov M.N. Reliability assessment of electronic component base // Materials of the International Conference: Scientific

research of the SCO countries: synergy and integration. Beijing, PRC. September 28, 2019. Part 2. Pp. 134–144.

5. Надёжность ЭРИ: Справочник. М.: Изд-во ЦНИИ 22 МО, 2006. 641 с.

6. Надёжность ЭРИ ИП: Справочник. М.: Изд-во ЦНИИ 22 МО, 2006. 52 с.

7. Пат. РФ №2613573. Устройство для определения нагрузочной способности микросхем / *Пиганов М.Н., Шопин Г.П., Тюлевин С.В., Мишанов Р.О.* Заявл. 28.10.2015; опубл. 17.03.2017. Бюл. №8.

8. *Piganov M.N., Tyulevin S.V., Erantseva E.S., Mishanov R.O.* Apparatus diagnostic for non-destructive control chip CMOS-type // European Science and Technology: materials of the VII international research and practice conference, Munich, October 16–17, 2014 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. Munich, Germany, 2014. Pp. 398–401.

9. *Mishanov R.O., Tyulevin S.V., Piganov M.N., Erantseva E.S.* Forecasting models generation of the electronic means quality // CEUR Workshop Proceedings. 2017. Pp. 124–129.

10. *Юрков Н.К., Затылкин А.В., Полесский С.Н., Иванов И.А., Лысенко А.В.* Основы теории надёжности электронных средств: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. 100 с.

11. *Михайлов В.С., Юрков Н.К.* Интегральные оценки в теории надёжности. Введение и основные результаты. Москва: Техносфера, 2020. 152 с.

12. *Жаднов В.В.* Расчётная оценка показателей долговечности электронных средств космических

аппаратов и систем // Надёжность и качество сложных систем, 2013. № 2. С. 65–73.

13. *Быков А.П., Пиганов М.Н.* Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 111. DOI: 10.34759/trd-2020-110-1

14. *Быков А.П., Андросов С.В., Пиганов М.Н.* Технология автоматизированных механических испытаний бортовых радиоэлектронных средств // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. №5. С. 38–46.

15. *Быков А.П., Андросов С.В., Пиганов М.Н.* Методика тепловакуумных испытаний приборов космического аппарата // Надёжность и качество сложных систем. 2019. № 3 (27). С. 78–83.

16. *Груничев А.С.* Испытание радиоэлектронной аппаратуры на надёжность. М.: Сов. радио, 1978. 310 с.

17. *Jerry G. Schlagheck.* Dinamic Analysis of Electronic Assemblies // Proc. Institute of Environmental Sciences. 1986. Pp. 128–131.

18. *Amorim S., Jonson R.A.* Experimental designs for estimating the correlation between two destructively tested variable // Journal of the American Statistical Associating. 1986. Vol. 81, No. 395. Pp. 807–812.

19. *Evans J.W., Jonson R.A., Green D.W.* Estimating correlating between variables under destructive testing, or how the same board twice // Technometrics. 1984. Vol. 26, No. 3. Pp. 285–290.

Поступила 27 ноября 2020 г.

English

RELIABILITY PERFORMANCE MEASURE MODEL AND METHOD FOR AVIONICS

Aleksey Petrovich Bykov — Postgraduate student, sub-department of design and technology electronic systems and devices, Samara National Research University¹; Lead test engineer, Space and Rocket Centre «Progress»².

E-mail: kipres@ssau.ru

¹*Address:* 443086, Russian Federation, Samara, Moskovskoe Ave. 34.

²*Address:* 443009, Russian Federation, Samara, Zemets St., 18.

Abstract: Avionics required reliability is to be implemented at later stages of its lifecycle but its reliability is embedded during the design stage. Therefore, calculation and estimation of avionics reliability is a significant part of designing avionics. Predictive, structural or physical calculation methods are used for this purpose. However, the applied methods do not fully take into account physical operating conditions of devices, which reduces results' accuracy and reliability of calculation and reliability assessment. This determines the relevance of research and testing of new models and evaluation methods. This research work is aimed at improving the assessment accuracy and reliability of spacecraft avionics performance. Microprocessor-based temperature controller was employed as research subject. Structural model was proposed to estimate spacecraft avionics performance reliability. Upon that, there was applied the procedure for breaking electrical circuit into "identical" parts as per conditions and operating time taking into account takeover indices, load capacity factors and diagnostic monitoring. This model-based new method is proposed for calculating and estimating performance reliability. Assessment is performed gradually in steps:

- preliminary calculation with regard to takeover indices and factor of organizational and technical measures at the particular enterprise;

- intermediate step is as per the results of separate or integrated tests to make it possible to consider individual prediction data;

- final step is as per results of flight tests.

Example of calculating the probability of failure-free operation of one channel of the device is given. The results of the calculation made it clear that the probability of failure-free operation of one channel of the device is 0.9701255 with specified probability of 0.96. Therefore, the device meets the requirements indicated in technical specifications for operational life and probability value of failure-free operation. The next stage of evaluation is based on the results of separate or integrated tests. The proposed model and method were tested at Rocket and Space Center "Progress" JSC.

Keywords: reliability, radio-electronic devices, model, method, calculation, probability of failure-free operation.

References

1. *Ivanov V.A.* Functional stability of systems. New vision of the system problem. Cosmonautics. Radio electronics. Geoinformatics: Proc. of II Int. Conference. Ryazan, 1998. Pp. 76–78.
2. *Kuznetsov A.S., Kuznetsov S.N., Ushkar M.N.* Methodology for choosing the optimal structure of RES. Telecommunications. 2016. No. 11. Pp. 52–56.
3. GOST 27.301-95. Reliability in technology. Calculation of reliability. Basic provisions. Moscow: Publishing House of Standards, 1996. 16 p.
4. *Stolbinsky D.V., Denisyuk A.A., Piganov M.N.* Reliability assessment of electronic component base. Materials of the International Conference: Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. Beijing, PRC. September 28, 2019. Part 2. Pp. 134–144.
5. Reliability of ERI: Reference book. Moscow: Publishing House of the Central Research Institute 22 MO, 2006. 641 p.
6. Reliability of ERI IP: Reference book. Moscow: Publishing House of the Central Research Institute 22 MO, 2006. 52 p.
7. Pat. RU No. 2613573. Device for determining the load capacity of microchips. *Piganov M.N., Shopin G.P., Tyulevin S.V., Mishanov R.O.* Appl. 28.10.2015; publ. 17.03.2017. Byul. No. 8.
8. *Piganov M.N., Tyulevin S.V., Erantseva E.S., Mishanov R.O.* Apparatus diagnostic for non-destructive control chip CMOS-type. European Science and Technology: materials of the VII international research and practice conference, Munich, October 16–17, 2014. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. Munich, Germany, 2014. Pp. 398–401.
9. *Mishanov R.O., Tyulevin S.V., Piganov M.N., Erantseva E.S.* Forecasting models generation of the electronic means quality. CEUR Workshop Proceedings. 2017. Pp. 124–129.
10. *Yurkov N.K., Zatytkin A.V., Polessky S.N., Ivanov I.A., Lysenko A.V.* Fundamentals of the theory of reliability of electronic means: textbook. Penza: PSU Publishing House, 2013. 100 p.
11. *Mikhailov V.S., Yurkov N.K.* Integral estimates in the theory of reliability. Introduction and main results. Moscow: Tehnosfera, 2020. 152 p.
12. *Zhadnov V.* The estimation of the durability of electronic means of spacecraft and systems Reliability and quality of complex systems, 2013. No. 2. Pp. 65–73.
13. *Bykov A.P., Piganov M.N.* The technique of independent tests of the onboard electronic devices of spacecraft Trudy MAI. 2020. No. 111. DOI: 10.34759/trd-2020-110-1
14. *Bykov A.P., Androsov S.V., Piganov M.N.* The technology of automated mechanical testing of onboard radio-electronic means. Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. 2020. No. 5. Pp. 38–46.
15. *Bykov A.P., Androsov S.V., Piganov M.N.* The technology of automated mechanical testing of onboard electronic means. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system. 2019. No. 3 (27). Pp. 78–83.
16. *Grunichev A.S.* Test of radio-electronic equipment for reliability. Moscow: Sov. radio, 1978. 310 p.
17. *Jerry G.* Schlagheck. Dinamic Analysis of Electronic Assemblies. Proc. Institute of Environmental Sciences. 1986. Pp. 128–131.
18. *Amorim S., Jonson R.A.* Experimental designs for estimating the correlation between two destructively tested variable. Journal of the American Statistical Associating. 1986. Vol. 81, No. 395. Pp. 807–812.
19. *Evans J.W., Jonson R.A., Green D.W.* Estimating correlating between variables under destructive testing, or how the same board twice. Technometrics. 1984. Vol. 26, No. 3. Pp. 285–290.