Разработка прогнозных математических моделей качества радиоэлектронных средств по результатам автономных испытаний

А.П. Быков, М.Н. Пиганов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34

Аннотация – В статье рассмотрена методика разработки прогнозных моделей (оператора прогнозирования) качества бортовой аппаратуры методом экстраполяции. Показано, что наиболее оперативно информацию о качестве и надежности аппаратуры можно получить по результатам автономных испытаний. Сделан выбор объекта испытаний. В качестве объекта автономных испытаний был выбран микропроцессорный контроллер температуры. В качестве прогнозируемого параметра было выбрано переходное сопротивление между электрическими цепями микропроцессорного контроллера температуры. Приведены результаты обучающего эксперимента. Для построения оператора прогнозирования использованы квазидетерминированные модели линейного, логарифмического, экспоненциального и параболического вида. При разработке моделей использовалась нормировка прогнозируемого параметра по математическому ожиданию. Выбор прогнозных моделей основывался на критериях минимальной средней дисперсии, вычисленной при контрольных временных точках испытаний, и минимальных значениях вероятности ошибочных решений и риска потребителя. Проведено исследование разработанного оператора, получены вероятностные характеристики его эффективности.

Ключевые слова – прогнозная модель, экстраполяция, квазидетерминированные модели, обучающий эксперимент, автономные испытания, бортовой прибор.

Введение

Постоянный рост сложности радиоэлектронных средств (РЭС), расширение их номенклатуры, переход к рыночным отношениям и ряд других факторов требует повышения требований к качеству выпускаемых изделий. Современные радиоэлектронные средства представляют собой сложный комплекс большого числа взаимосвязанных блоков, функциональных узлов и электронных компонентов. К РЭС космического назначения в первую очередь предъявляют требования высокой надежности, долговечности и безопасности. Достижение требуемого уровня этих характеристик невозможно без проведения ряда работ по подтверждению заданных ресурсных характеристик. Основной подход в решении этой задачи базируется на проведении натурных испытаний [1; 2]. Они включают большой комплекс исследований и контрольных операций необходимых для отработки электрических схем и конструкции РЭС, а также экспериментального подтверждения показателей надежности [3]. Анализ результатов испытаний является трудоемкой задачей и требует постоянной оптимизации и совершенствования этой процедуры. Большое значение имеет сокращение общей трудоемкости всех видов испытательных воздействий. Для этого требуется совершенствование моделей и методик их проведения

и оценки результатов. При этом целесообразно перенести центр тяжести с контроля и испытания готовых изделий на этап отработочных испытаний в процессе их проектирования [4]. Такие испытания позволяют своевременно внести изменения в схему, конструкцию и технологию изготовления бортовых РЭС космических аппаратов (КА).

Наиболее оперативно информацию о качестве и надежности бортовой аппаратуры КА можно получить по результатам автономных испытаний [5; 6].

Весьма актуальным остаются вопросы прогнозирования показателей качества и надежности бортовых РЭС КА по результатам испытаний. Решение этих вопросов сдерживается из-за отсутствия достаточно достоверных прогнозных математических моделей.

Целью данного исследования является разработка прогнозных математических моделей для оценки и прогнозирования качества и надежности РЭС по результатам автономных испытаний.

1. Анализ результатов испытаний

В качестве объектов испытаний были выбраны командная радиолиния, микропроцессорный контроллер температуры (МКТ) и система приема и преобразования информации КА. В данной статье

Таблица 1. Значение $\Delta R/R$, %
 Table 1. $\Delta R/R$ value, %

№	Класс	25 ч	100 ч	250 ч	500 ч	1000 ч
1	1	4	12	29	40	44
2	1	5	14	30	41	49
3	2	4	15	36	47	53
4	1	3	10	18	22	27
5	1	2	11	20	25	31
6	2	2	15	33	46	59
7	2	3	15	35	44	62
8	1	4	13	27	33	40
9	1	2	12	27	32	36
10	1	2	12	19	25	28
11	1	1	13	26	30	35
12	2	3	16	31	48	63
13	1	3	10	18	23	29
14	2	3	14	32	47	61
15	1	2	9	25	29	34
16	2	4	17	31	44	58
17	1	5	11	21	26	30
18	2	6	16	30	43	55
19	1	2	14	19	23	26
20	2	4	16	41	49	66
21	1	3	10	20	26	33
22	2	5	15	32	41	57
23	2	4	15	33	45	56
24	1	4	10	25	28	34
25	2	6	18	29	51	72
26	2	5	16	36	50	68
27	1	3	11	24	32	38
28	2	4	19	40	46	70
29	2	5	16	42	48	71
30	1	3	14	28	33	41
31	2	3	21	33	49	64
32	1	3	13	27	40	47
33	2	4	14	30	41	52
34	1	1	9	18	24	32
35	1	2	9	20	33	43
$\bar{x}$		3,4	13,571429	28,142857	37,257143	47,542857
δ^2		1,6588235	8,7815126	46,12605	91,961345	216,13782
δ		1,2879532	2,9633617	6,7916162	9,5896478	14,701626

рассматриваются результаты испытаний прибора МКТ, т. к. его автономные испытания уже завершены [5; 7]. Анализ результатов для других объектов будет рассмотрен после завершения их испытаний.

Микропроцессорный контроллер предназначен для управления агрегатами системы терморегулирования космического аппарата при его штатной работе и при наземных испытаниях, а также для приема-передачи контрольной и командной информации по мультиплексному каналу обмена. Прибор состоит из трех идентичных каналов. Каждый канал прибора содержит пять модулей. Прибор устанавливается на сотовых панелях в негерметичных отсеках КА. В соответствии с ТУ и КД

он должен иметь минимальные значения переходных сопротивлений R_{Π} между электрическими цепями прибора. Выберем этот параметр в качестве прогнозируемого при разработке моделей.

Исходные данные для ИП приведены в табл. 1. В ней отражены результаты измерений параметра $\Delta R/R$ (%) для каждого экземпляра выбора при контрольных временных точках испытаний 25, 100, 250, 500, 1000 ч.

2. Выбор метода прогнозирования

В связи с тем что в результатах испытаний информация о значении прогнозируемого параметра i -го экземпляра к моменту времени $t_{\text{пр}} [y^{(i)}(t_{\text{пр}})]$ заложена в значениях прогнозируемого параметра

этого экземпляра на начальном участке времени $y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_R)$, выберем в качестве базового метода индивидуальное прогнозирование (ИП) экстраполяции. Метод экстраполяции основан на использовании квазитермированных моделей (КД) [8]. КД-моделями удобно пользоваться благодаря их простоте. В этом случае мы имеем меньшее по сравнению с многомерной плотностью распределения прогнозируемого параметра число аргументов и независимость их числа от интервала времени, на котором исследуется случайный процесс. Их целесообразно использовать при исследовании надежности РЭС по постепенным от- казам.

Задача прогнозирования экстраполяцией с оценкой значения прогнозируемого параметра состоит в нахождении такого оператора H_y (прогнозной модели), с помощью которого по совокупности значений прогнозируемого параметра $\{y^{(j)}(t_i)\}$ j -го экземпляра находится оценка значения этого экземпляра $y^{*(j)}(t_{пр})$ к моменту $t_{пр}$ в виде $y^{*(j)}(t_{пр}) = H_y \left[y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_k) \right]$.

Задача прогнозирования экстраполяцией с классификацией заключается в отыскании такого оператора $H_{укл}$, который позволяет по совокупности значений $\{y^{(j)}(t_i)\}$ оценить принадлежность j -го экземпляра к тому или иному классу $K_s^{*(j)}$:

$$H_{укл} \left[y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_k) \right] \rightarrow K_s^{*(j)}.$$

Решение об отношении j -го экземпляра к классу K_1 (классу годных) принимается в том случае, если

$$H_{укл} \left[y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_k) \right] \geq \Pi,$$

а к классу K_2 (классу бракованных), если

$$H_{укл} \left[y^{(j)}(t_1), y^{(j)}(t_2), \dots, y^{(j)}(t_k) \right] < \Pi,$$

если Π – пороговое значение оператора $H_{укл}$.

3. Разработка прогнозных моделей

Для разработки рабочих прогнозных моделей воспользуемся программным комплексом

«Прогнозирование v.2» [9]. В качестве исходных выберем линейную, параболическую, логарифмическую и экспоненциальную КД-модели. Это связано со слабой изученностью объекта исследования. При разработке моделей использовалась нормировка по математическому ожиданию прогнозируемого параметра.

С помощью метода наименьших квадратов, реализованного в программе «Прогнозирование 2.0», были найдены коэффициенты $\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_m$ для каждого рассматриваемого вида КД-моделей. Были получены следующие модели:

– линейная:

$$\frac{\Delta R}{R} = 5,500627 + 0,0689931t;$$

– параболическая:

$$\frac{\Delta R}{R} = -0,25589 + 0,1526702t - 0,0000155t^2;$$

– логарифмическая:

$$\frac{\Delta R}{R} = -36,32478 + 11,606798 \ln(t + 1);$$

– экспоненциальная:

$$\frac{\Delta R}{R} = 34,372666 \exp\left(\frac{-61,86983}{t + 1}\right).$$

Выбор прогнозной модели основывался на критериях минимальной средней дисперсии $D_{ср}$, вычисленной при контрольных временных точках испытаний, и минимальных значениях вероятности ошибочных решений $P_{ош}$ и риска потребителя $P_{пт}$.

4. Исследование и анализ моделей

Влияние порога классификации на вероятность ошибочных решений и другие характеристики приведены на рис. 1. На рис. 2–13 содержатся результаты испытаний и расчетные данные по моделям.

Результаты классификации приведены в табл. 2.

Таким образом в качестве прогнозной модели целесообразно принять логарифмическую и линейную модели, обеспечивающие минимальную среднюю дисперсию, а также минимальные значения $P_{ош}$ и $P_{пт}$.

Таблица 2. Результаты классификации
 Table 2. Classification results

	Вид квазидетерминированной модели			
	Линейная	Логарифмическая	Экспоненциальная	Параболическая
$P_{ош}$	0,343	0,086	0,457	0,429
$P_{потр}$	0	0,136	0,457	0,441
$P_{изг}$	0,429	0,122	0	0

Рис. 1. Влияние порога классификации на вероятность ошибочных решений и другие характеристики
 Fig. 1. Influence of the classification threshold on the probability of erroneous decisions and other characteristics

Рис. 2. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по линейной модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки
 Fig. 2. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the linear model and test results for 3 samples of the sample

Рис. 3. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по линейной модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки
 Fig. 3. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the linear model and test results for 15 instances of the sample

Рис. 4. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по линейной модели и результатам испытаний для 34-го экземпляра выборки

Fig. 4. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the linear model and test results for 34 instances of the sample

Рис. 5. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по параболической модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

Fig. 5. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the parabolic model and test results for 3 instances of the sample

Рис. 6. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по параболической модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

Fig. 6. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the parabolic model and test results for 15 instances of the sample

Рис. 7. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по параболической модели и результатам испытаний для 34-го экземпляра выборки

Fig. 7. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the parabolic model and test results for 34 instances of the sample

Рис. 8. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по логарифмической модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

Fig. 8. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the logarithmic model and test results for 3 instances of the sample

Рис. 9. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по логарифмической модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

Fig. 9. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the logarithmic model and test results for 15 instances of the sample

Рис. 10. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по логарифмической модели и результатам испытаний для 34-го экземпляра выборки

Fig. 10. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the logarithmic model and test results for 34 instances of the sample

Рис. 11. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по экспоненциальной модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

Fig. 11. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the exponential model and test results for 3 instances of the sample

Рис. 12. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по логарифмической модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

Fig. 12. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the logarithmic model and test results for 15 instances of the sample

Рис. 13. Временная зависимость прогнозируемого параметра $\Delta R/R$ по логарифмической модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

Fig. 13. Time dependence of the predicted parameter $\Delta R/R$ according to the logarithmic model and test results for 3 instances of the sample

Список литературы

1. Колесников А.В. Испытания конструкций и систем космических аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2007. 105 с.
2. Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 504 с.
3. Лисейкин В.А., Моисеев Н.Ф., Фролов О.П. Основы теории испытаний. Экспериментальная отработка ракетно-космической техники. М.: Машиностроение-Полет; Виарт Плюс, 2015. 260 с.
4. Бахвалов Ю.О. Испытания ракетно-космической техники. М.: АИР, 2015. 227 с.
5. Быков А.П. Алгоритм проведения автономных испытаний радиоэлектронных средств // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 3. С. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.97-104>
6. Быков А.П., Андросов С.В., Пиганов М.Н. Методика тепловвакуумных испытаний приборов космического аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3 (27). С. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2019-3-9>
7. Быков А.П., Пиганов М.Н. Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 111. DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7>
8. Пиганов М.Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок. М.: Новые технологии, 2002. 267 с.
9. Мишанов Р.О., Пиганов М.Н. Разработка прогнозной модели качества полупроводниковых приборов методом экстраполяции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 4 (3). С. 594–599. URL: http://www.ssc.smr.ru/izv_2014_4.html

References

1. Kolesnikov A.V. *Testing of Structures and Systems of Spacecraft*. Moscow: Izd-vo MAI, 2007, 105 p. (In Russ.)
2. Fedorov V.K., Sergeev N.P., Kondrashin A.A. *Control and Testing in the Design and Production of Radio Electronic Equipment*. Moscow: Tehnosfera, 2005, 504 p. (In Russ.)
3. Lisejkin V.A., Moiseev N.F., Frolov O.P. *Foundations of Test Theory. Experimental Development of Rocket and Space Technology*. Moscow: Mashinostroenie-Polet; Viart Pljus, 2015, 260 p. (In Russ.)
4. Bahvalov Yu.O. *Testing of Rocket and Space Technology*. Moscow: AIR, 2015, 227 p. (In Russ.)
5. Bykov A.P. Algorithm for conducting autonomous tests of radio electronic means. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.97-104> (In Russ.)
6. Bykov A.P., Androsov S.V., Piganov M.N. Technique for thermal vacuum testing of spacecraft instruments. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem*, 2019, no. 3 (27), pp. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2019-3-9> (In Russ.)
7. Bykov A.P., Piganov M.N. Method of autonomous testing of on-board radio electronic devices of spacecraft. *Trudy MAI*, 2020, no. 111, DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7> (In Russ.)
8. Piganov M.N. *Individual Prediction of Quality Indicators of Elements and Components of Microassemblies*. Moscow: Novye tehnologii, 2002, 267 p. (In Russ.)
9. Mishanov R.O., Piganov M.N. Development of a predictive model for the quality of semiconductor devices by extrapolation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 4 (3), pp. 594–599. URL: http://www.ssc.smr.ru/izv_2014_4.html (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 1, pp. 39–47

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.1.39-47

Received 28 December 2020

Accepted 5 February 2021

Development of predictive mathematical models of the quality of radio electronic equipment based on the results of autonomous tests

Alexey P. Bykov, Mikhail N. Piganov

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086, Russia

Abstract – The article discusses the methodology for developing a predictive model (forecasting operator) of the quality of onboard equipment using the extrapolation method. It is shown that the most efficient information about the quality and reliability of the equipment can be obtained from the results of autonomous tests. The choice of the test object was made. A microprocessor temperature controller was chosen as the object of autonomous tests. The transition resistance between the electrical circuits of the microprocessor temperature controller was chosen as a predicted parameter. The results of the training experiment are presented. To construct the forecasting operator, quasi-deterministic models of linear, logarithmic, exponential, and parabolic forms are used. When developing the models, the normalization of predicted parameter by mathematical expectation was used. The choice of predictive models was based on the criteria of minimum average variance, calculated at the test time points, and the minimum values of the probability of erroneous decisions and consumer risk. The research of the developed operator was carried out, probabilistic characteristics of its efficiency are obtained.

Keywords – forecasting model, extrapolation, quasidetermined models, teaching experiment, autonomous tests, the onboard device.

Информация об авторах

Быков Алексей Петрович, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: проектирование и моделирование систем радиоэлектронной борьбы.

E-mail: kipres@ssau.ru

Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: надежность и качество бортовых радиоэлектронных средств.

E-mail: piganov@ssau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1830-4507>

Information about the Authors

Alexey P. Bykov, postgraduate student of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: design and simulation of electronic warfare systems.

E-mail: kipres@ssau.ru

Mikhail N. Piganov, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: reliability and quality of board electrical equipment.

E-mail: piganov@ssau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1830-4507>