

## Прогнозирование показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств

Быков А.П.<sup>1,2\*</sup>, Пиганов М.Н.<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

<sup>2</sup>Ракетно-космический центр «Прогресс», улица Земеца, 18, Самара,  
443052, Россия

\*e-mail: [bykal@yandex.ru](mailto:bykal@yandex.ru)

\*\* e-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru)

*Статья поступила 12.02.2021*

### Аннотация

В статье приведена методика разработки прогнозных математических моделей и индивидуального прогнозирования показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств космических аппаратов по результатам автономных испытаний. Для прогнозирования был выбран метод экстраполяции, который основан на использовании квазидетерминированных моделей. Исходными для прогнозирования служили данные обучающего эксперимента, полученные после второго цикла испытательных воздействий. Предложены линейная, параболическая, логарифмическая и экспоненциальная модели. Проведено исследование указанных моделей.

**Ключевые слова:** прогнозирование, качество, радиоэлектронное устройство, испытания, математическая модель, исследование, экстраполяция.

## Введение

Среди изделий ракетно-космической техники (РКТ) и космических комплексов важное место занимают космические аппараты (КА) [1]. Современные КА должны обеспечивать большие сроки активного функционирования. Эти сроки определяются, в первую очередь, надежностью бортовых радиоэлектронных устройств (БРЭУ). При проектировании БРЭУ ставятся задачи расширения функциональных возможностей, снижения массогабаритных показателей, увеличения быстродействия при одновременном повышении надежности [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.

Достижение высокого уровня надежности и безопасности космических аппаратов невозможно без проведения ряда работ по подтверждению заданных ресурсных характеристик. Основной подход в решении этой задачи базируется на проведении натурных испытаний [3, 4].

Для обеспечения высокого уровня качества и надежности радиоэлектронных средств (РЭС) КА целесообразно перенести центр тяжести с контроля и испытания готовых изделий на этап отработочных испытаний в процессе их проектирования. Это актуально также в связи с освоением новых конструктивно-технологических вариантов (КТВ) РЭС и методов их монтажа.

Такие испытания позволяют своевременно внести изменения в конструкцию и технологию изготовления бортовых РЭС.

В процессе наземной экспериментальной отработки образцов ракетно-космической техники (РКТ) проводятся различные испытания [5-11]: тепловые, электрические, вибродинамические, радиочастотные, климатические, радиационные и др. Одной из важнейших задач любых испытаний узлов, приборов и систем РКТ является моделирование в эксперименте таких режимов, которые в наибольшей степени отвечают реальным условиям их транспортировки и эксплуатации [12].

Проведение испытаний и осуществление экспериментальной отработки изделий РКТ является одним из важных этапов процесса создания надежных и конкурентоспособных образцов. Испытания как основная форма контроля изделий представляет собой экспериментальное определение его количественных и качественных показателей при воздействии на него различных факторов в процессе функционирования и при его моделировании [13].

Экспериментальная отработка является составной частью всех этапов проектирования изделия. Она, как правило, завершает процесс разработки изделия.

### **Задача прогнозирования**

Задачи прогнозирования качества и надежности РЭА можно решать различными путями. В самом общем плане прогнозирование разделяют на эвристическое и математическое. Под математическим прогнозированием понимают количественную или качественную оценку параметра в будущем, полученную по результатам исследования поведения процесса или состояния объекта в настоящий

момент времени и основанную на изучении и количественном описании объективных закономерностей. Среди видов математического прогнозирования широко распространено вероятностное прогнозирование.

Вероятностное прогнозирование основано на использовании вероятностных моделей. Изготовление и эксплуатация современной РЭА сопровождаются сложными физическими процессами, протекающими в ее элементах и материалах. Современные технологические (и испытательные) операции, которым сопутствуют бесчисленное множество случайных микрообразований, сложные условия эксплуатации в конечном итоге проявляются в некотором разбросе значений параметров элементов, материалов и выходных характеристик РЭА. Вероятностные методы прогнозирования адекватны природе изучаемых объектов радиоэлектроники [14].

Для ответственных объектов наиболее эффективно индивидуальное прогнозирование (ИП). Оно основано на изучении вероятностной связи между  $y^{(j)}(t_{\text{пр}})$  – значением прогнозируемого параметра  $j$ -ого экземпляра к моменту  $t_{\text{пр}}$  и начальным состоянием этого  $j$ -ого экземпляра. При этом различают индивидуальное прогнозирование на основе теории распознавания образов и ИП экстраполяцией.

В индивидуальном прогнозировании на основе теории распознавания образов начальное состояние каждого экземпляра оценивается по значениям информативных параметров изделия, которые вероятностно связаны с прогнозируемым параметром. В ИП экстраполяцией для оценки начального состояния каждого экземпляра измеряются значения прогнозируемого параметра на

коротком интервале времени контроля (наблюдения)  $t_k$ , причем  $t_k$  намного меньше времени прогнозирования  $t_{пр}$ , т.е.  $t_k \ll t_{пр}$ .

### Обучающий эксперимент

Были проведены автономные испытания бортового микропроцессорного контроллера температуры [15]. При этом использовался алгоритм, приведенный в [16]. В ходе автономных испытаний проводили дефектопический контроль прибора и его узлов [17, 18]. Выбор оборудования проводился с учетом [19]. Его состав приведен в [15]. Исходными для прогнозирования служили данные обучающего эксперимента, полученные после второго цикла испытательных воздействий (табл.1). В табл. 1 приведены результаты измерений дрейфа переходного сопротивления  $\Delta R/R(\%)$  для каждого экземпляра выбора при контрольных временных точках испытаний 25, 100, 250, 500, 1000ч. Второй цикл испытательных воздействий включал проверку функционирования прибора в нормальных климатических условиях, испытание на воздействие пониженного давления, испытание на воздействие повышенной влажности.

Таблица 1 – Значение  $\Delta R/R$ , %

| №  | Класс | 25 ч | 100 ч | 250 ч | 500 ч | 1000 ч |
|----|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| 1  | 2     | 21   | 25    | 56    | 70    | 105    |
| 2  | 1     | 19   | 23    | 51    | 65    | 96     |
| 3  | 1     | 18   | 22    | 48    | 63    | 91     |
| 4  | 2     | 27   | 34    | 73    | 97    | 138    |
| 5  | 1     | 16   | 21    | 49    | 59    | 83     |
| 6  | 1     | 15   | 18    | 33    | 42    | 74     |
| 7  | 1     | 17   | 22    | 41    | 52    | 85     |
| 8  | 2     | 26   | 32    | 64    | 85    | 127    |
| 9  | 1     | 12   | 15    | 32    | 41    | 59     |
| 10 | 1     | 13   | 16    | 35    | 448   | 66     |
| 11 | 1     | 17   | 21    | 45    | 66    | 87     |
| 12 | 1     | 16   | 19    | 43    | 55    | 82     |
| 13 | 1     | 12   | 15    | 31    | 40    | 63     |

|            |   |           |           |           |           |           |
|------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 14         | 2 | 28        | 36        | 73        | 92        | 143       |
| 15         | 1 | 10        | 13        | 29        | 34        | 52        |
| 16         | 1 | 20        | 24        | 50        | 71        | 97        |
| 17         | 2 | 22        | 27        | 54        | 76        | 109       |
| 18         | 1 | 20        | 25        | 48        | 67        | 98        |
| 19         | 1 | 18        | 22        | 42        | 68        | 89        |
| 20         | 1 | 18        | 23        | 46        | 62        | 90        |
| 21         | 2 | 23        | 29        | 52        | 79        | 116       |
| 22         | 1 | 15        | 19        | 44        | 54        | 77        |
| 23         | 1 | 12        | 15        | 34        | 42        | 60        |
| 24         | 1 | 10        | 13        | 27        | 33        | 53        |
| 25         | 2 | 31        | 40        | 77        | 108       | 155       |
| 26         | 1 | 11        | 15        | 30        | 39        | 57        |
| 27         | 1 | 13        | 16        | 31        | 38        | 64        |
| 28         | 1 | 16        | 20        | 40        | 52        | 81        |
| 29         | 1 | 17        | 21        | 43        | 57        | 85        |
| 30         | 2 | 24        | 30        | 64        | 81        | 122       |
| 31         | 1 | 10        | 13        | 25        | 32        | 51        |
| 32         | 2 | 28        | 35        | 79        | 102       | 141       |
| 33         | 1 | 11        | 14        | 36        | 38        | 55        |
| 34         | 1 | 12        | 15        | 34        | 43        | 62        |
| 35         | 2 | 26        | 33        | 71        | 90        | 134       |
| $\bar{x}$  |   | 17,828571 | 22,314286 | 46,571429 | 72,6      | 89,914286 |
| $\delta^2$ |   | 34,969748 | 55,221849 | 229,36975 | 4703,9529 | 871,55126 |
| $\delta$   |   | 5,9135225 | 7,4311405 | 15,144958 | 68,58537  | 29,522047 |

### Разработка прогнозных моделей

Для разработки рабочих прогнозных моделей воспользуемся программным комплексом «Прогнозирование v.2» [20]. В качестве исходных выберем линейную, параболическую, логарифмическую и экспоненциальную КД модели. 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:

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

– параболическая:

$$\frac{\Delta R}{R} = 12,449861 + 0,1370069 \cdot t - 0,000032 \cdot t^2;$$

– логарифмическая:

$$\frac{\Delta R}{R} = -48,68744 + 18,050424 \cdot \ln(t + 1);$$

– экспоненциальная:

$$\frac{\Delta R}{R} = 51,64085 \cdot \exp\left(\frac{-30,64393}{t+1}\right).$$

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

### Исследование и анализ моделей

Влияние порога классификации на вероятность ошибочных решений и другие характеристики приведено на рис. 1.

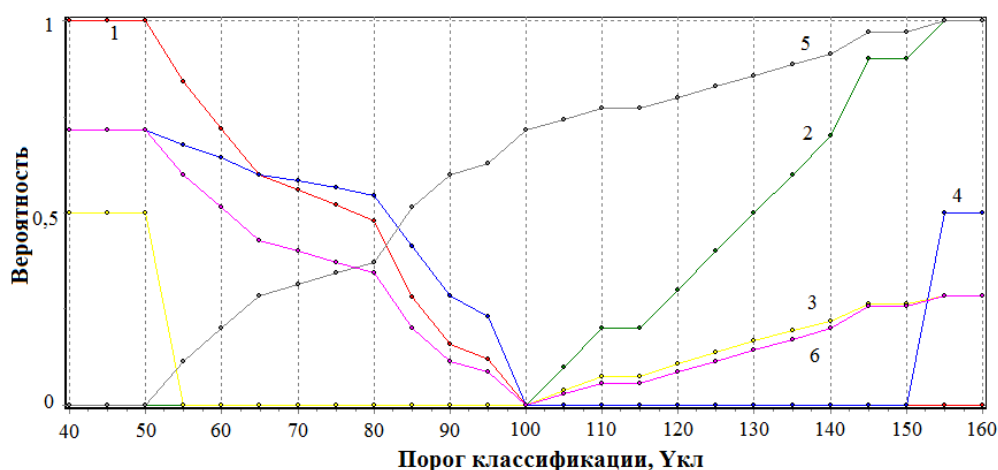


Рис. 1. Влияние порога классификации на вероятность ошибочных решений и другие характеристики: 1, 2 – условные вероятности принятия ошибочных решений; 3 – риск потребителя  $P_{\text{пт}}$ ; 4 – риск изготовителя  $P_{\text{изг}}$ ; 5 – априорная вероятность принятия решения об отнесении экземпляра к классу  $K_1$  (классу годных); 6 – вероятность ошибочных решений  $P_{\text{ош}}$

На рис. 2-13 приведены результаты испытаний и расчетные данные по моделям.

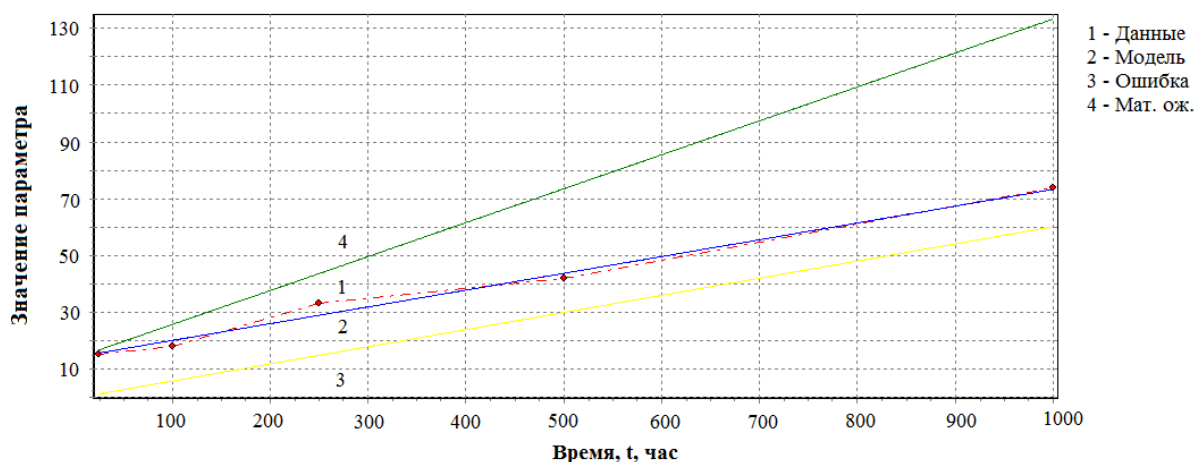


Рис. 2. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по линейной модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

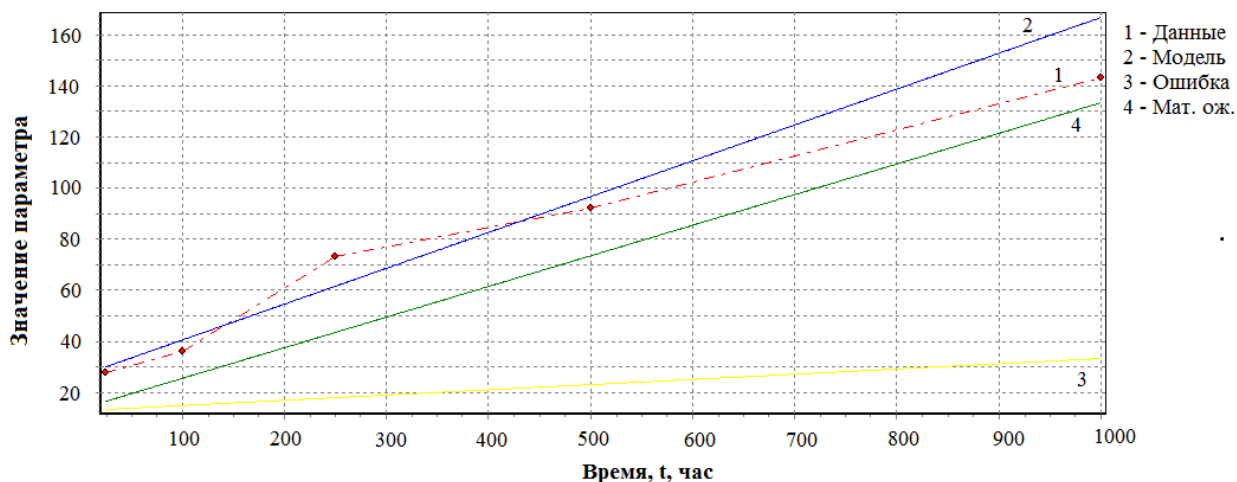


Рис. 3. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по линейной модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

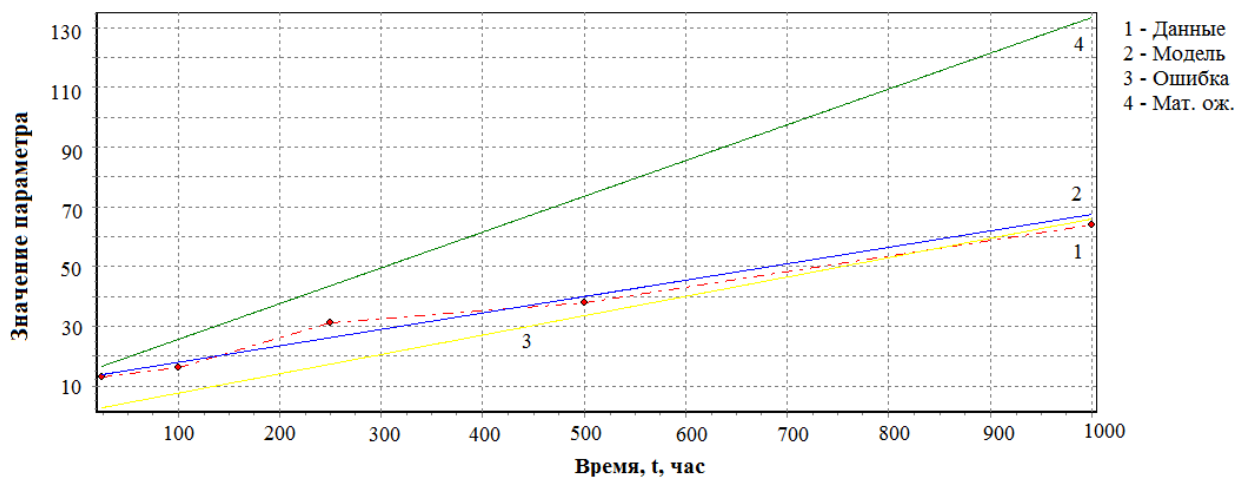


Рис. 4. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по линейной модели и результатам испытаний для 34-го экземпляра выборки



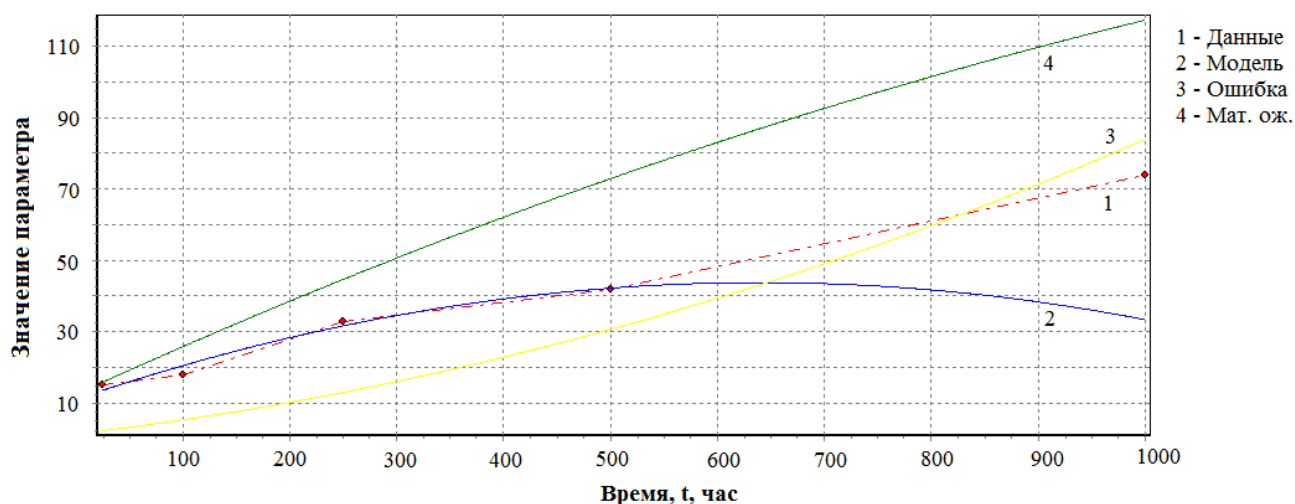


Рис. 5. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по параболической модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

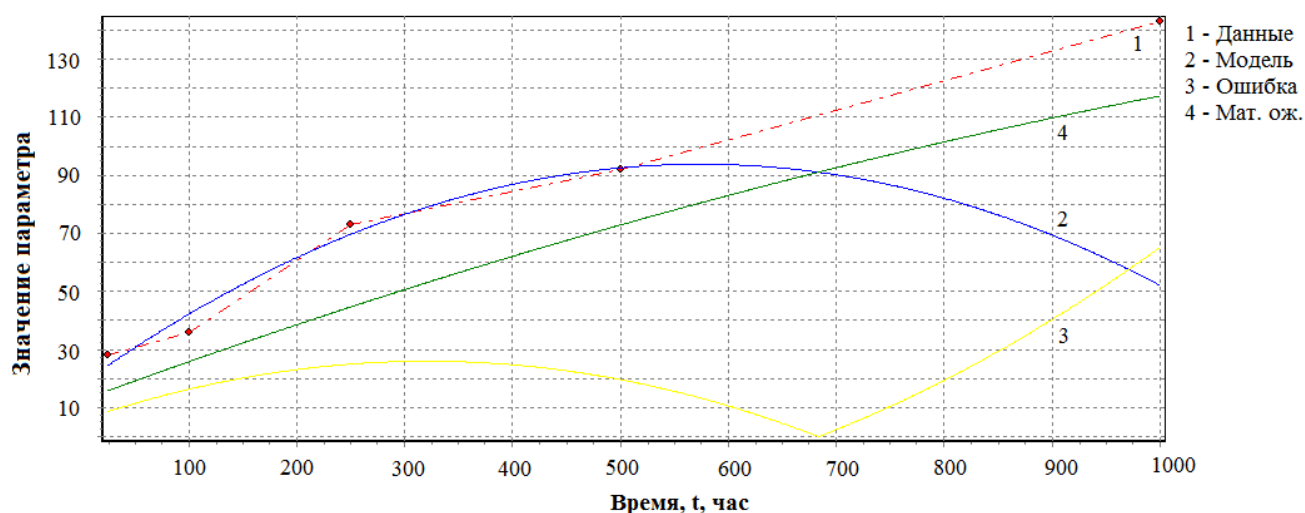


Рис. 6. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по параболической модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

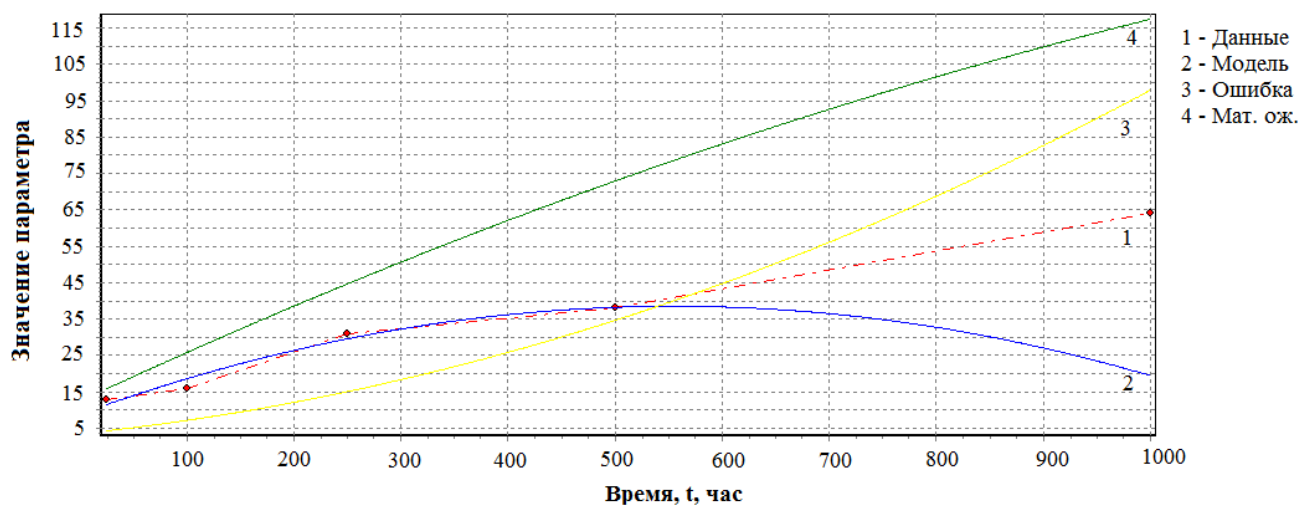


Рис. 7. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по параболической модели и результатам испытаний для 34-го экземпляра выборки

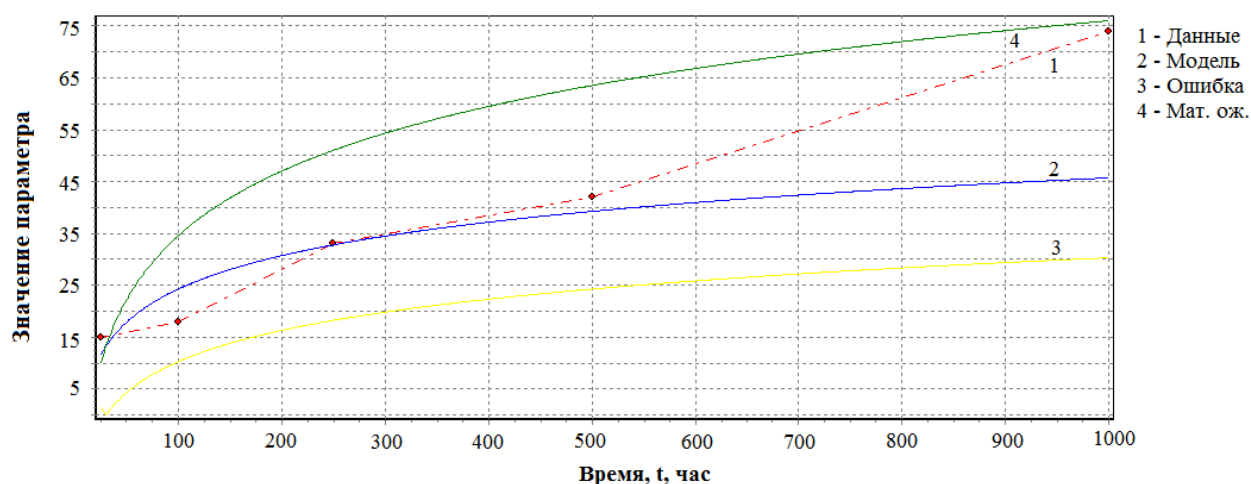


Рис. 8. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по логарифмической модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

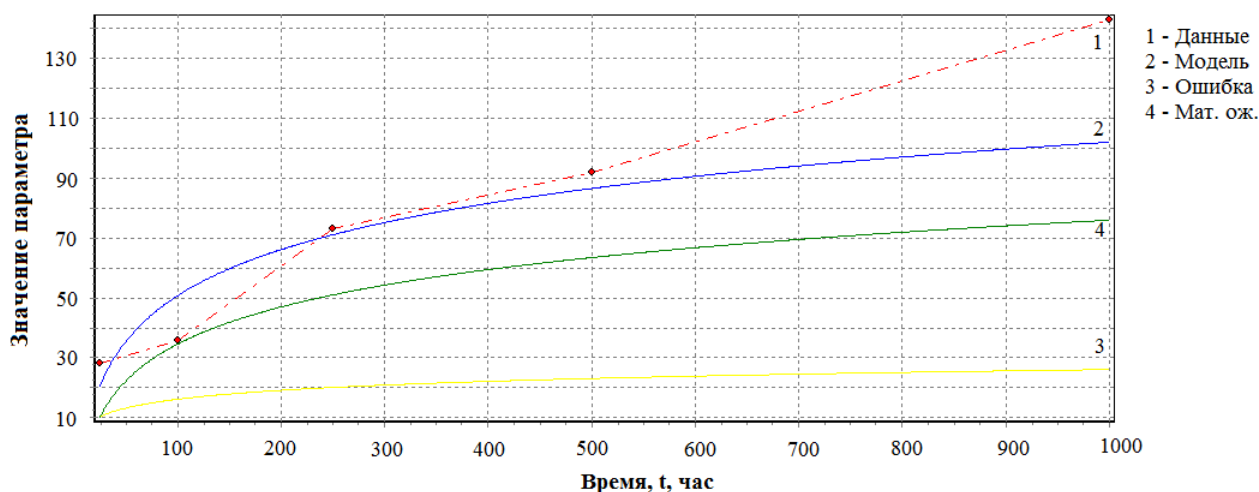


Рис. 9. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по логарифмической модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

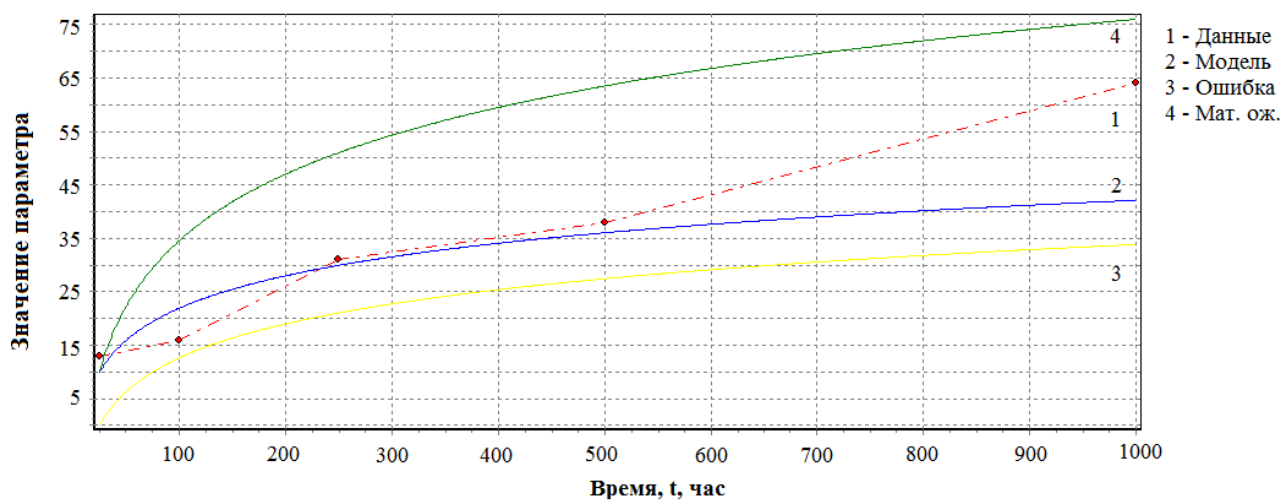


Рис. 10. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по логарифмической модели и результатам испытаний для 34-го экземпляра выборки

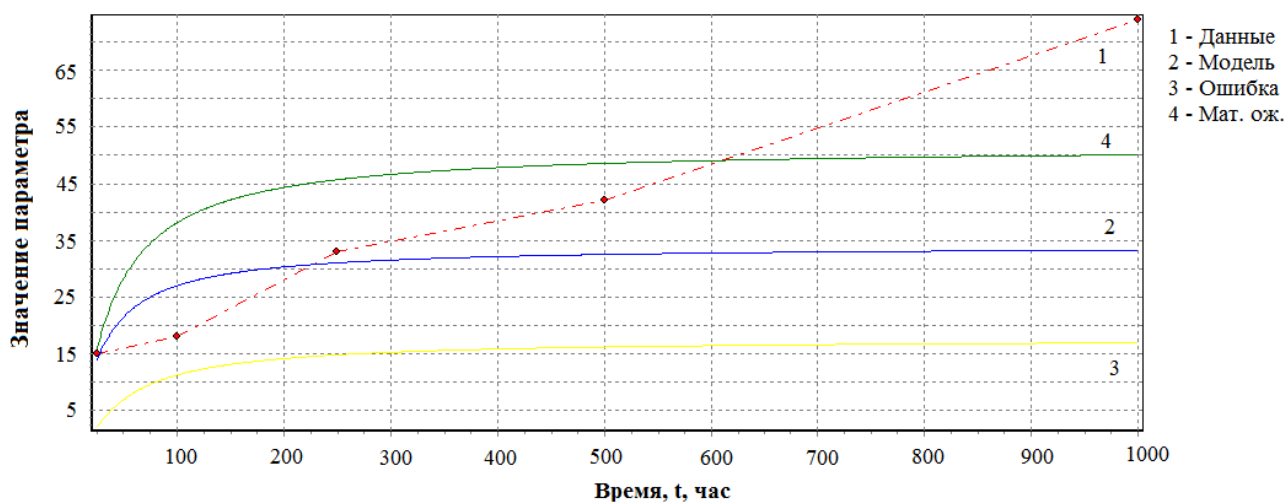


Рис. 11. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по экспоненциальной модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

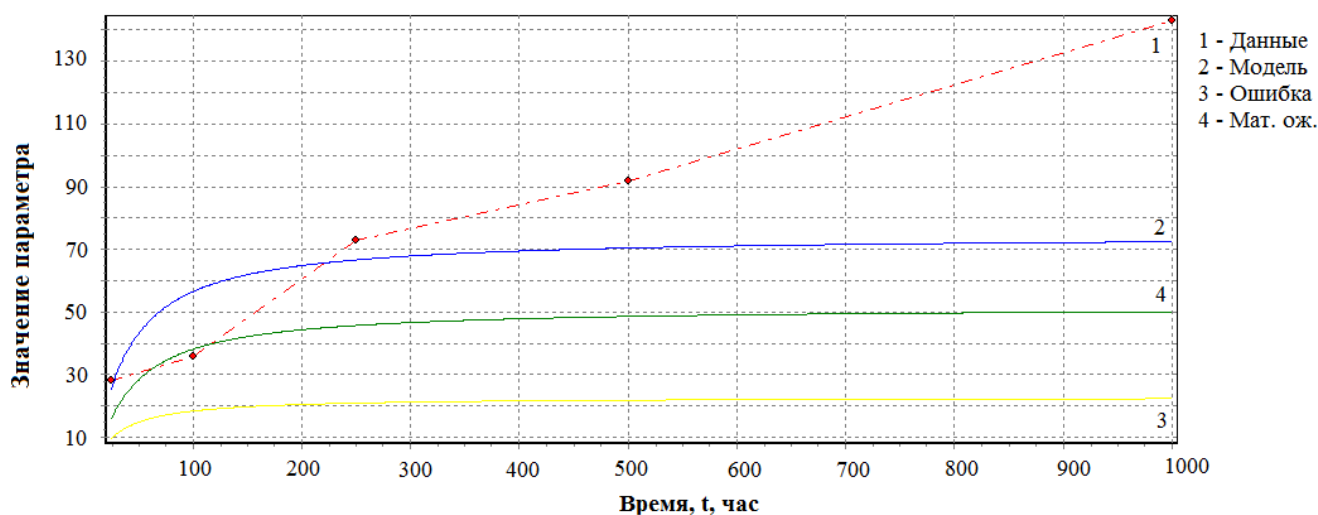


Рис. 12. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по экспоненциальной модели и результатам испытаний для 15-го экземпляра выборки

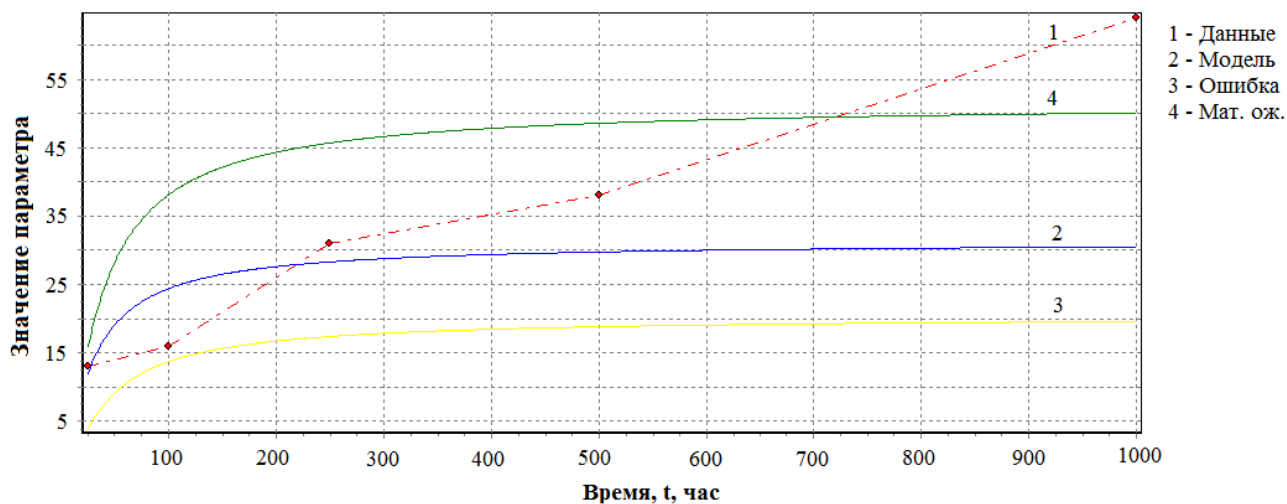


Рис. 13. Временная зависимость прогнозируемого параметра  $\Delta R/R$  по экспоненциальной модели и результатам испытаний для 3-го экземпляра выборки

Результаты классификации приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты классификации

|                  | <b>Вид квазидетерминированной модели</b> |                 |                  |                |
|------------------|--|-----------------|------------------|----------------|
|                  | линейная                                 | логарифмическая | экспоненциальная | параболическая |
| $R_{\text{ош}}$  | 0,343                                    | 0,143           | 0,286            | 0,171          |
| $R_{\text{пт}}$  | 0  | 0,167           | 0,286            | 0,194          |
| $R_{\text{изг}}$ | 0,545                                    | 0               | 0                | 0              |

### **Заключение**

Показано, метод экстраполяции может быть использован для прогнозирования показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств по результатам автономных испытаний. В качестве прогнозной модели целесообразно принять логарифмическую модель, обеспечивающую минимальную среднюю дисперсию, минимальное значение  $R_{\text{изг}}$  и приемлемое значение  $R_{\text{ош}}$ ; линейную, обеспечивающую минимальное значение  $R_{\text{пт}}$ , а также параболическую, обеспечивающую минимальное значение  $R_{\text{изг}}$  и приемлемое значение  $R_{\text{ош}}$ .

### **Библиографический список**

1. Романов А.В. Космический аппарат как сложная техническая система // II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (II Козловские чтения): сборник материалов (Самара, 12 - 16 сентября 2011). - Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С. 266 - 271.
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. Колесников А.В. Испытания конструкций и систем космических аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 105 с.

4. 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.

5. Колчанов И.П., Делков А.В., Лавров Н.А., Кишкин А.А., Ходенков А.А. Математическое моделирование тепловых испытаний космических аппаратов с применением криогенных экранов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 56 - 64.

6. Казаков В.А., Сенюев И.В. Измерение распределения температуры на поверхности образца при испытаниях в тепловых аэродинамических трубах // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81065>

7. Везенов В.И., Иванов А.В., Кононенко А.Ю., Капитанов В.А., Межевихин А.Ю., Морозов С.С., Фалеев О.В. Сериков С.А. Основные принципы создания комплексов автоматизации наземных электроиспытаний и подготовка к пуску РКН на примере РКН типа «Союз» // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества»: сборник материалов (Самара, 28 сентября - 3 октября 2009). - Самара: Самарский научный центр РАН, 2009. С. 102 - 104.

8. Ильин А.Н., Прокофьев Е.Н., Гришаев Д.Ю. Обеспечение электрических испытаний космических аппаратов наземным силовым оборудованием // V всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-

космической техники» (V Козловские чтения): сборник материалов (Самара, 11 - 15 сентября 2017). - Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. Т. 1. С. 559 - 561.

9. Баюшев С.В. Применение конечно элементного моделирования при проектировании и топологической оптимизации испытательной оснастки для вибродинамических испытаний // V всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения): сборник материалов (Самара, 11 - 15 сентября 2017). - Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. Т. 2. С. 168 - 176.

10. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. ГОСТ 30804.4.3-2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – 43 с.

11. Костин А.В., Пиганов М.Н. Методика измерения помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2 (4). С. 804 - 810.

12. 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.

13. Кручинин М.М., Кузьмин Д.А. Математическое моделирование копровых испытаний шасси вертолета // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77093>

14. Пиганов М.Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок. – М.: Новые технологии, 2002. – 267 с.

15. Быков А.П., Пиганов М.Н. Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 111.

URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115124>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-7](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7)

16. Быков А.П. Алгоритм проведения автономных испытаний радиоэлектронных средств // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23. № 3. С. 97 - 104.

17. Павлов П.В., Попов Ф.Н. Информационно-диагностический комплекс дефектоскопического контроля // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76780>

18. Павлов П.В., Горюнов А.Е. Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57019>

19. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам В.А. Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов // Труды МАИ. 2015. №

81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57879>

20. 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.

# Quality indices prediction of onboard radio-electronic devices

**Bykov A.P.<sup>1,2\*</sup>, Piganov M.N.<sup>1\*\*</sup>**

*<sup>1</sup>Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse,  
Samara, 443086, Russia*

*<sup>2</sup>Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress,  
18, Zemetsa str., Samara, 443009, Russia*

*\*e-mail: [bykal@yandex.ru](mailto:bykal@yandex.ru)*

*\*\* e-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru)*

## **Abstract**

The article presents a technique for developing predictive mathematical models and quality indicators individual forecasting of the spacecraft onboard radio-electronic devices by the results of autonomous tests. For forecasting, Extrapolation method, based on the quasi-deterministic models application, was selected. Transient resistance between electrical circuits of the microprocessor based temperature controller, which installed on the honeycomb panels in the spacecraft unpressurized compartments, was selected as the predictable parameter. The training experiment data, obtained after the second cycle of the testing impacts, served as initial data for the prediction.

The second cycle of tests included checking the device functioning in normal climatic conditions, a low pressure effect test, and a higher humidity effect test. Linear, parabolic, logarithmic, and exponential models were proposed. When these models developing the predictable parameter normalizing by the mathematical expectation was used. The forecast models selection was based on minimum average dispersion criteria, computed at the



reference temporal points of tests and minimum values of the erroneous solutions probability and consumer's risk. The study of the above said models was performed.

Probabilistic characteristics of their efficiency were obtained. It was established that the logarithmic model ensured minimum average dispersion values and the manufacturer's risk, as well as acceptable erroneous solution probability value, i.e. consumer's risk minimum value. The parabolic model allows obtaining zero value of the manufacturers risk and acceptable level of erroneous solutions probability.

**Keywords:** prediction, quality, radio-electronic device, tests, mathematical model, research, extrapolation.

### References

1. Romanov A.V. *II Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki" (II Kozlovskie chteniya)*, Samara. Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2011, pp. 266 - 271.
2. Fedorov V.K., Sergeev N.P., Kondrashin A.A. *Kontrol' i ispytaniya v proektirovanii i proizvodstve radioelektronnykh sredstv* (Monitoring and testing while electronic equipment design and manufacturing), Moscow, Tekhnosfera, 2005, 504 p.
3. Kolesnikov A.V. *Ispytaniya konstruksii i sistem kosmicheskikh apparatov* (Spacecraft structures and systems testing), Moscow, Izd-vo MAI, 2007, 105 p.
4. Bykov A.P., Androsov S.V., Piganov M.N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, 2019, no. 3 (27), pp. 78 - 83.

5. Kolchanov I.P., Delkov A.V., Lavrov N.A., Kishkin A.A., Khodenkov A.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*, 2015, no. 1, pp. 56 - 64.
6. Kazakov V.A., Senyuev I.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81065>
7. Vezenov V.I., Ivanov A.V., Kononenko A.Yu., Kapitanov V.A., Mezhevikhin A.Yu., Morozov S.S., Faleev O.V. Serikov S.A. *Vserossiiskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki i ee rol' v ustoichivom sotsial'no-ekonomicheskom razvitií obshchestva"*, Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2009, pp. 102 - 104.
8. Il'in A.N., Prokof'ev E.N., Grishaev D.Yu. *V vsereiisskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki» (V Kozlovskie chteniya)*, Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2017, vol. 1, pp. 559 - 561.
9. Bayushev S.V. *V vsereiisskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki" (V Kozlovskie chteniya)*, Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2017, vol. 2, pp. 168 - 176.
10. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoichivost' k radiochastotnomu elektromagnitnomu polyu. Trebovaniya i metody ispytanií. GOST 30804.4.3-2013* (Electromagnetic compatibility of technical equipment. Radiofrequency electromagnetic field immunity. Requirements and test methods. State Standard 30804.4.3-2013), Moscow, Standartinform, 2014, 43 p.
11. Kostin A.V., Piganov M.N. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 2 (4), pp. 804 - 810.

12. Liseikin V.A., Moiseev N.F., Frolov O.P. *Osnovy teorii ispytaniy. Eksperimental'naya otrabotka raketno-kosmicheskoi tekhniki* (Test theory basics. Experimental finishing of missile and space equipment), Moscow, Mashinostroenie-Polet / Viart Plyus, 2015, 260 p.
13. Kruchinin M.M., Kuz'min D.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77093>
14. Piganov M.N. *Individual'noe prognozirovanie pokazatelei kachestva elementov i komponentov mikrosborok* (Individual Prediction of Elements and Components Quality Indicators of Micro-assemblies), Moscow, Novye tekhnologii, 2002, 267 p.
15. Bykov A.P., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115124>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-7](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-7)
16. Bykov A.P. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 97 - 104.
17. Pavlov P.V., Popov F.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=76780>
18. Pavlov P.V., Goryunov A.E. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57019>
19. Dembitskii N.L., Lutsenko A.V., Fam V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57879>
20. Mishanov R.O., Piganov M.N. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 4 (3), pp. 594 - 599.