

УДК 629.783; 537.622

## **Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надежности космических аппаратов длительного функционирования**

Алешин В. Ф.<sup>1,\*</sup>, Колобов А. Ю.<sup>2</sup>,  
Петров Ю. А.<sup>2</sup>

\* [victorfa@mail.ru](mailto:victorfa@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-производственное объединение им. С.А.Лавочкина, Химки, Россия

---

Современное развитие науки и техники позволило создавать космическую технику с длительными (10 - 15 лет) сроками активного существования. При этом повышаются требования к надежности.

Надежность космических аппаратов в первую очередь зависит от надежности радиоэлектронной аппаратуры, которая обеспечивается выбором электронной компонентной базы и резервированием составных частей.

Надежность конструктивных элементов обеспечивается запасами прочности, закладываемыми при проектировании. Для оценки надежности конструкции предложена формула, основанная на коэффициентах запаса и коэффициентах вариации механических характеристик материала и нагрузки.

Представлены материалы по методологии обеспечения надежности в ФГУП НПО им.С.А.Лавочкина».

Рассмотрены проблемы, возникающие при прогнозировании и подтверждении надежности в процессе создания космических аппаратов длительного функционирования.

Основными проблемами являются отсутствие адекватных методик прогнозирования и оценки надежности сложных систем длительного функционирования и устаревшая нормативная и справочная литература.

Предложены мероприятия по решению указанных проблем.

**Ключевые слова:** космическая техника, надежность, прогнозирование надежности, запас прочности

---

Современное развитие науки и техники позволило создавать космическую технику (КТ) с длительными (10 - 15 лет) сроками активного существования (САС), что повысило требование к ее надежности [1,2].

Любой космический аппарат является сложной технической системой, состоящей из множества устройств, отличающихся по своему составу, физическим принципам, условиям и циклограммам функционирования.

Составные части КА можно условно разделить по физическим принципам на следующие группы:

- радиоэлектронные приборы и устройства;
- устройства электромеханического или механического типа, имеющие подвижные соединения (например, электромеханические привода антенн);
- устройства механического типа, не имеющие подвижных частей (элементы конструкции типа рам, корпусов, балок, шпангоутов, установочных узлов, элементов крепления и т.п.);
- устройства одноразового действия (например, пиротехнические устройства, устройства раскрытия панелей солнечных батарей).

При этом составные части КА сами являются сложными системами, по сложности соизмеримыми с самим КА. Примерами служат бортовой комплекс управления, радиокомплекс, система электроснабжения.

На надежность космического аппарата в первую очередь влияет надежность радиоэлектронной аппаратуры из-за высокой чувствительности электрорадиоизделий (ЭРИ) к внешним воздействиям космического пространства и динамических воздействий при выведении КА [4].

Надежность конструктивных элементов обеспечивается запасами прочности, закладываемыми при проектировании.

В качестве основного критерия надежности принимается достижение максимальным напряжением, возникающим в конструкции, предела прочности (предела текучести, предела усталости или предела устойчивости) хотя бы в одном элементе конструкции.

Нагрузка и несущая способность рассматриваются как случайные функции. Принимается допущение, что пересечения реализаций нагрузки  $N(t)$  и несущей способности  $R(t)$  являются редкими случайными событиями, а распределение реализаций в каждом сечении  $t = t_j$  – нормальным. Применение нормального закона оправдано тем, что в случае совместного действия большого числа случайных возмущений, подчиняющимся различным законам распределения, если среди них нет преобладающего, результирующее возмущающее воздействие имеет, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, распределение, близкое к нормальному.

В квазистатической постановке задачи при нормальном распределении  $R(t)$  и  $N(t)$  и отсутствии между ними корреляционной зависимости вероятность неразрушения конструкции определяется как [5,6]:

$$P = \Phi \left( \frac{m_R - m_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}} \right)$$

где  $\Phi(x)$  – функция нормального распределения;

$m_{Ri}, m_{Ni}$  – математические ожидания (МО)  $R(t)$  и  $N(t)$ ;

$\sigma_{Ri}, \sigma_{Ni}$  – среднеквадратические отклонения (СКО)  $R(t)$  и  $N(t)$ .

Традиционно принимают, что предельные отклонения расчетной и эксплуатационной нагрузок от математического ожидания равны трем СКО.

Тогда после преобразований формула приобретает более удобный для практического использования вид:

$$P = \Phi \left( \frac{\frac{n}{1-3\nu_R} - \frac{1}{1+3\nu_N}}{\sqrt{\left(\frac{n\nu_R}{1-3\nu_R}\right)^2 + \left(\frac{\nu_N}{1+3\nu_N}\right)^2}} \right),$$

где  $n = R/N$  (или произведение коэффициентов безопасности и запаса);

$\nu_R, \nu_N$  ( $\nu_i = \frac{\sigma_i}{m_i}$ ) - коэффициенты вариации нагрузок.

В худшем случае, когда коэффициент безопасности и коэффициент запаса равны соответственно 1,3 и 1, а коэффициенты вариации нагрузок равны 10%, значение функции нормального распределения составляет 6,43 и в соответствии с вероятностью неразрушения превышает 0,99999999. Это означает, что закладывание в конструкции нормативных коэффициентов безопасности обеспечивает практически абсолютную надежность конструкции.

Обеспечивать надежность радиоэлектронной аппаратуры намного сложнее. Аппаратура должна быть в рабочем состоянии в течение всего заданного в Техническом задании срока активного существования космического аппарата. Например, для космических аппаратов разработки ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина» «Электро-Л» - это не менее 10 лет, «Спектр-Р» - не менее 3 лет.

На современные КА и их бортовые системы и приборы в процессе эксплуатации действуют как внешние факторы

- механические воздействия (наземная эксплуатация, старт и выведение в Космос, разделение ступеней и отделение КА, коррекции орбиты),
- тепловые воздействия,
- климатические воздействия в земных условиях,
- радиационные воздействия (электроны и протоны естественного и искусственного происхождения),

так и из-за исполнения аппаратуры в негерметичных контейнерах дополнительные факторы, которые сегодня из-за все более широкого применения микросхем приобретают значимость:

- воздействие вакуума,
- воздействие тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), вызывающее проявление тиристорного эффекта, а также потерю информации на флэшносителях,
- воздействие собственной атмосферы,
- воздействие электростатических разрядов,
- проявление эффектов электромагнитной совместимости бортовых систем,
- деградация ЭРИ при длительных сроках активного существования.

Количество ЭРИ в космическом аппарате впечатляюще, это - 90 – 140 тысяч электрорадиоизделий (ЭРИ), соединенных между собой как с использованием различных схем резервирования, так и без резервирования. Например, в КА «Электро-Л» - 104559 штук, в КА «Спектр-Р» - 77528 штук. Обеспечение надежного длительного функционирования в условиях космического пространства радиоэлектронной аппаратуры, содержащей такое количество элементов и выполненной в негерметичном исполнении, является сложнейшей задачей, требующей значительных интеллектуальных и материальных затрат.

Результатом технического прогресса с одной стороны стала миниатюризация электронной компонентной базы (ЭКБ) с заменой радиоламп полупроводниковыми изделиями и затем печатных плат микросхемами, с другой – возник ряд проблем, ранее отсутствующих. В частности, микросхемы и флэшпамять чувствительны к воздействию радиации, особенно к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), и воздействию электростатического разряда.

Обеспечение надежности радиоэлектронной бортовой аппаратуры космических аппаратов «Электро-Л», а также аппаратов серии «Спектр» ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина» осуществляет по нескольким направлениям

- использование опыта, накопленного в ходе других проектов,
- выполнение требований нормативной документации, внедренной в отрасли,
- применение различных видов резервирования (поэлементного, поканального, поприборного),
- проведение наземной экспериментальной отработки в полном объеме, определенном отраслевой нормативной документацией,
- включение в технические задания на разработку бортовых систем повышенных требований к надежности и качеству используемых ЭРИ,
- проведение мероприятий по комплектованию бортовых систем электронной компонентной базой повышенного качества,
- соблюдение технологической дисциплины,
- осуществление постоянного контроля специалистами ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина» разработок, выполняемых предприятиями кооперации,
- функционирование сертифицированной системы качества.

Особое внимание при этом уделяется электронной компонентной базе. В радиоэлектронной аппаратуре используются ЭРИ отечественного производства категории качества «ОС», «ОСМ» и «ВП». В случае отсутствия отечественной элементной базы, обеспечивающей выполнение требований, предъявляемых к ЭРИ по надежности, быстродействию, массе и энергопотреблению, в аппаратуре применяются ЭРИ иностранного производства космического, военного и промышленного назначения.

В обеспечение надежности ЭРИ проводятся дополнительные испытания ЭРИ: отбраковочные испытания, диагностический неразрушающий контроль и разрушающий

физический анализ электрорадиоизделий в Испытательных технических центрах; проведена сертификация иностранной электронной компонентной базы.

Проведенные мероприятия позволили обеспечить предприятия-изготовители бортовой аппаратуры электрорадиоизделиями повышенной надежности и качества с интенсивностью отказов ЭРИ на уровне  $\lambda = 1 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-10}$  1/час.

Процесс обеспечения надежности изделия состоит из следующих этапов

- задание требований надежности,
- нормирование надежности,
- прогнозирование надежности,
- подтверждение надежности.

Каждый из этих этапов обладает своими особенностями и проблемами. Рассмотрим основные из этих проблем.

### **Задание требований надежности**

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, устанавливающие обоснованные требования к безотказности КТ с учетом сложности изделий, их назначения, условий и длительности функционирования. Часто устанавливаемые в тактико-технических (ТТЗ) или технических (ТЗ) заданиях уровни безотказности устанавливаются волюнтаристски на недостижимом уровне, например, 0,95 для сроков активного существования (САС) 10-15 лет. Такая практика приводит к значительному удорожанию разработок и увеличению веса изделий.

### **Прогнозирование надежности**

Традиционно при теоретических оценках безотказности радиоэлектронной аппаратуры КА используется экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы (ВБР), который давал хорошее подтверждение результатами эксплуатации при САС менее 3 - 5 лет. При этом для оценки безотказности радиоэлектронных составных частей КА применяется методика ГОСТ Р 51901.14-2007, основанная на моделях 22 ЦНИИ МО [6].

Однако опыт эксплуатации КА с длительными САС показал, что

- имеется весьма большой разброс достигнутых САС КА одного типа, особенно заметный для КА длительного функционирования,
- оценки надежности КАДФ и бортовой аппаратуры, выполненные по традиционным моделям 22 ЦНИИ МО, представленным в справочнике «Надежность электрорадиоизделий», дают завышенные значения,
- отсутствие методик, позволяющих с достаточной достоверностью прогнозировать надежность изделий РКТ длительного функционирования на этапах эскизного и рабочего проектирования приводит к невыполнению требований ТТЗ (ТЗ) в процессе эксплуатации космической техники длительного функционирования.

Известны случаи, когда реальные уровни надежности не соответствуют прогнозным оценкам. Так одна из серий отечественных КА имела средний срок активного существования 3,9 года вместо 7 лет при выполнении всех запланированных мероприятий по обеспечению качества и надежности, несмотря на то, что предприятие-разработчик обладает достаточным техническим и кадровым обеспечением, высокоэффективной службой качества, а также имеет возможность доступа к надежной ЭКБ, как отечественной, так и импортной [2,3].

Таким образом, конструктивные решения, основанные на существующих методах прогнозирования надежности КА длительного функционирования, не позволяют обеспечить достаточную точность реализаций заданных требований ТЗ, несмотря на все усилия, предпринимаемые предприятиями-разработчиками.

Причины завышенных оценок безотказности и долговечности КА длительного функционирования в порядке простого перечисления без ранжирования можно привести следующие.

- 1 Недостаточная адекватность экспоненциального закона распределения вероятности для систем высокой сложности, с различными типами внутреннего резервирования (как поэлементного, так и поблочного и поканального), длительного функционирования и с составными частями различной физической сущности (конструктивными, радиоэлектронными, механическими, одноразовыми и многоразовыми, деградирующими и стабильными и др.) [7,8].
- 2 Отсутствие в существующих методиках оценки надежности радиоэлектронной бортовой аппаратуры учета деградационных процессов ЭРИ, приводящей к уменьшению САС [7].
- 3 Проведение вероятностных оценок радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры вне расчета надежности.
- 4 Недостаточно адекватные и по некоторым позициям устаревшие данные по интенсивностям отказов ЭРИ, приведенные в Справочнике электрорадиоизделий [6], который не переиздавался с 2006г. Например, для кабеля марки МС16-17 в Справочнике приведено значение  $\lambda=0,02 \cdot 10^{-9}$  1/час, а для более современного близкого ему по характеристикам кабелю марки МС16-25 -  $\lambda=766,7 \cdot 10^{-9}$  1/час. (различие в 38000 раз!) Производитель кабеля объясняет это различным объемом имеющихся статистических данных.
- 5 Некоторые коэффициенты моделей Справочника электрорадиоизделий [6] недостаточно обоснованы. Например, для аппаратуры, разрабатываемой по Положению РК вводится коэффициент, понижающий  $\lambda$ -характеристики ЭРИ в 2 раза.
- 6 Для ЭРИ иностранного производства отсутствуют доступные данные по их  $\lambda$ -характеристикам и по моделям оценки их безотказности. В Справочнике [6] приведены только групповые расчетные модели.

## Подтверждение надежности

Подтверждение надежности изделий КТ проводится на всех этапах ОКР расчетными, расчетно-экспериментальными и экспериментальными методами.

При подтверждении надежности расчетными методами присутствуют те же проблемы, что и при прогнозировании: отсутствие современных адекватных методик оценки надежности сложных систем космического назначения с длительными САС, отсутствие достоверных исходных данных для расчетов (справочных данных по  $\lambda$ -характеристикам ЭРИ).

Большинство ОКР по созданию космических комплексов научного и народно-хозяйственного назначения направлено на создание единичных уникальных КА. Это приводит к невозможности получения статистических оценок надежности КА и его составных частей при наземной экспериментальной отработке (НЭО) в условиях финансовых ограничений.

Таким образом при наземной экспериментальной отработке прямыми методами подтверждается только работоспособность изделий и прочностная надежность конструктивных элементов. Ускоренные ресурсные испытания качественно подтверждают косвенным путем ресурс и безотказность радиоэлектронной составляющей КА. При этом ГОСТ РВ 50698-94 однозначно определяет методику ускоренных испытаний только при САС до 3-х лет. Для аппаратуры с САС более 3-х лет нормативное установление циклограммы испытаний отсутствует и разработка методики отдается на откуп предприятию-разработчику аппаратуры. Результаты ресурсных испытаний имеют недостаточную информативность, так как отсутствуют испытательные стенды, имитирующие реальные условия эксплуатации (одновременно радиационные условия, глубокий вакуум и тепловые условия). Поэтому некоторые разработчики не проводят ресурсные испытания в наземных условиях, перенося их на экспериментальную эксплуатацию.

Проблемы при задании требований по надежности и их подтверждении усугубляются не утвердившейся до конца терминологией по надежности. Разработанный ГОСТ Р 27.002-2009 взамен ГОСТ 27.002-89 оказался неудачным и был отменен. В настоящее время ведется работа по созданию новой редакции стандарта по терминологии в области надежности. При этом, как видно из публикаций, до сих пор определение специалистами термина «надежность» колеблется между параметрической и функциональной формой его определения [9]. Содержание термина «надежность» определяет критерий отказа изделия и, следовательно, методику оценки его вероятности безотказной работы.

Обобщая сказанное выше, можно сделать следующие выводы

- 1 Отсутствие достоверных методик прогнозирования и подтверждения безотказности КА длительного функционирования и их составных частей не позволяет задавать в ТТЗ (ТЗ) адекватные современному уровню развития

космической техники требования надежности, а затем прогнозировать и подтверждать заданные уровни надежности.

- 2 Необходимо разработать нормативные документы, определяющие методические основы прогнозирования и подтверждения надежности КА длительного функционирования.
- 3 Назрела насущная необходимость корректировки и переиздания Справочника по надежности электрорадиоизделий, включая данные по  $\lambda$ -характеристикам ЭРИ, коэффициентам и моделям надежности.
- 4 В нормативной литературе необходимо установить типовые методики ускоренных ресурсных испытаний аппаратуры с длительными САС, учитывающих длительность САС и назначение КА.
- 5 Необходимо разработать нормативную и методическую базы для прогнозирования и оценки надежности единичных уникальных КА длительного функционирования.

Перечисленные проблемы усугубляют и без того острую проблему с комплектованием КА качественной электронной компонентной базой.

### Список литературы

1. Афиногенов Е.И., Волосатова Т.М., Сельвесюк Н.И., Чичварин Н.В. Анализ методов и средств контроля систем дистанционного зондирования Земли // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/322927.html> (дата обращения 01.05.2015).
2. Крылов А. ГЛОНАСС – 10 лет надежды. Состояние и развитие орбитальной группировки ГЛОНАСС за 10 лет XXI века // Технологии и средства связи. 2011. № 1. Режим доступа: <http://www.tssonline.ru/articles2/sputnik/glonass-10-let-nadejdi> (дата обращения 14.01.2015).
3. Корчагин Е.Н., Колобов А.Ю. Проблемные вопросы оценки безотказности космических аппаратов длительного функционирования // Международная конференция и Российская научная школа молодых ученых и специалистов «Системные проблемы надежности, качества, компьютерного моделирования, кибернетических, информационных и телекоммуникационных технологий в инновационных проектах» (ИННОВАТИКА-2013): тр. Ч. 1. М.: Энергоатомиздат, 2013. С. 60-61.
4. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Расчетная оценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2012. № 1. С. 29-33.
5. Русаков А.В. Расчетно-экспериментальное обеспечение надежности элементов конструкций космических летательных аппаратов на этапе проектирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2000.



6. Надежность электрорадиоизделий. Справочник. М.: Изд-во МО РФ, 2006. С. 196.
7. Стрельников В.П. Методические погрешности оценок надежности электронных элементов и систем // Системотехника. 2009. № 7. С. 15-19. Режим доступа: <http://systech.miem.edu.ru/2009/strelnikov.htm> (дата обращения 01.05.2015).
8. Стрельников В.П. Расчет надежности параллельных структур на основе аппарата функций случайных аргументов с использованием DN-распределения // Системотехника. 2008. № 6. С. 19-23. Режим доступа: <http://systech.miem.edu.ru/2008/n6/strelnikov.html> (дата обращения 01.05.2015).
9. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 25-27.
10. Блинов Д.С., Морозов М.И., Анисимов П.Д. Математическое и программное обеспечение для обработки результатов метрологических измерений деталей роликовинтовой передачи // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 1. С. 12-31. DOI: [10.7463/0115.0753736](https://doi.org/10.7463/0115.0753736)

## Challenging Issues for Predicting and Validating Reliability of Sustained Spacecraft Operation

V. F. Alyoshin<sup>1,\*</sup>, A.Yu. Kolobov<sup>2</sup>,  
J.A. Petrov<sup>2</sup>

\* [victorfa@mail.ru](mailto:victorfa@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Scientific and Production Association of S.A. Lavochkin, Khimki, Russia

---

**Keywords:** space equipment, reliability, reliability forecasting, margin of safety

---

Modern science and technology development has allowed creation of space technology with long (10 - 15 years) Lifetime, which resulted in increasing demand for its reliability.

Spacecraft reliability primarily depends on the reliability of electronic equipment, which is ensured by the choice of electronic components and redundant components.

A safety margin of construction taken into consideration at the designing stage ensures reliability of structural components. To evaluate design reliability a formula is proposed which is based on the safety factors and variation coefficients of mechanical characteristics of the material and load.

A technique of the Federal State Unitary Enterprise "Lavochkin Association" to ensure reliability is presented.

The paper considers the problems arising in predicting and validating reliability at the stage of creating a spacecraft of sustained operation. Thus the main problems are as follows: an error when using the exponential law of probability distribution for the highly complicated sustained operation systems, a lack of records of degradation processes in existing techniques for reliability evaluation of radio-electronic airborne equipment, a probability estimate of radio-electronic equipment hardness beyond the calculating reliability, non-well adequate and, for some positions, aged data on the failure rate of electronic components, listed in Directory 2006, and some insufficiently justified coefficients of Directory models.

The paper offers measures to solve abovementioned problems.

### References

1. Afinogenov E.I., Volosatova T.M., Sel'vesyuk N.I., Chichvarin N.V. Analysis of methods and means of controlling Earth remote sensing systems. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*. 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/322927.html>, accessed 01.05.2015). (in Russian).

2. Krylov A. GLONASS - 10 years of hope. Status and development of the GLONASS orbital grouping per 10 years of the 21 century. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2011, no. 1. Available at: <http://www.tsonline.ru/articles2/sputnik/glonass-10-let-nadejdi> , accessed 14.01.2015). (in Russian).
3. Korchagin E.N., Kolobov A.Yu. Problematic issues of reliability assessment of long-term spacecraft. *Mezhdunarodnaya konferentsiya i Rossiiskaya nauchnaya shkola molodykh uchennykh i spetsialistov "Sistemnye problemy nadezhnosti, kachestva, komp'yuternogo modelirovaniya, kiberneticheskikh, informatsionnykh i telekommunikatsionnykh tekhnologii v innovatsionnykh proektakh" (INNOVATIKA-2013): tr. Ch. 1* [Proc. of the International conference and Russian scientific school of young scientists and specialists "System reliability and quality problems, computer modeling, cybernetic, information and communication technologies in innovative projects" (Innovatika-2013). Pt. 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2013, pp. 60-61. (in Russian).
4. Abrameshin A.E., Zhadnov V.V., Zhadnov I.V. Estimation Reliability of Electronic Module Equipment Spacecraft. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestivosti = Technologies of electromagnetic compatibility*, 2012, no. 1, pp. 29-33. (in Russian).
5. Rusakov A.V. *Raschetno-eksperimental'noe obespechenie nadezhnosti elementov konstruksii kosmicheskikh letatel'nykh apparatov na etape proektirovaniya. Avtoreferat kand. diss.* [Calculation and experimental ensuring the reliability of structural elements of spacecraft at the design stage. Abstract of cand. diss.]. Samara, 2000. (in Russian).
6. Nadezhnost' elektroradioizdelii. Spravochnik [Reliability of electrical radio products. Handbook]. Moscow, Russian Defense Ministry Publ., 2006, p. 196. (in Russian).
7. Strel'nikov V.P. Methodical error of the estimates of the reliability of electronic components and systems. *Sistemotekhnika = Systems engineering*, 2009, no. 7, pp. 15-19. Available at: <http://systech.miem.edu.ru/2009/strelnikov.htm> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
8. Strel'nikov V.P. Calculation of reliability of parallel structures on the basis of functions of random arguments with the use of DN-distribution. *Sistemotekhnika = Systems engineering*, 2008, no. 6, pp. 19-23. Available at: <http://systech.miem.edu.ru/2008/n6/strelnikov.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
9. Netes V.A., Taras'ev Yu.I., Shper V.L. How we should define what "dependability" is. *Nadezhnost' = Dependability*, 2014, no. 4, pp. 25-27. (in Russian).
10. Blinov D.S., Morozov M.I., Anisimov P.D. Mathematical Support and Software for Processing Results of Metrological Roller Screw Detail Measurements. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 1, pp. 12-31. DOI: [10.7463/0115.0753736](https://doi.org/10.7463/0115.0753736) (in Russian).