

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 006.91:53.089.62

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>



Критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов

А. С. Ефремов¹ , Е. А. Михайлов¹ , М. В. Окрапилов²

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия
 vka@mil.ru

² ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Мобильные метрологические комплексы находятся в эксплуатации преимущественно на открытом воздухе, с высокой интенсивностью производственных нагрузок, в постоянно меняющихся условиях применения. Важным фактором обеспечения функционирования мобильных метрологических комплексов является обоснованное определение их остаточного ресурса.

Однако для обоснования остаточного ресурса мобильных метрологических комплексов не всегда в полном объеме очевидны критерии оценки предельного состояния рабочих эталонов и средств измерений из их состава. Тематика метрологической надежности таких средств измерений раскрыта в многочисленных научных статьях, тем не менее, вопросы определения предельного состояния и оценивания остаточного ресурса мобильных метрологических комплексов в полной мере не решены и требуют дальнейшей проработки.

Представленное исследование имело целью обосновать критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов на основе риск-ориентированного подхода.

Риски выявлены методом анализа конструктивных и функциональных особенностей мобильных метрологических комплексов в триаде подсистем: транспортной, измерительной, обеспечивающей. Выполнены математические расчеты признаков и критериев предельного состояния мобильных метрологических комплексов. Признаки и критерии основаны на учете уровня рисков от скрытых метрологических отказов средств измерений на межповерочных интервалах.

Обоснован подход к определению показателей рисков с учетом динамики изменения метрологических характеристик рабочих эталонов и средств измерений в процессе эксплуатации. Установлены признаки и критерии наступления предельного состояния подсистем мобильных метрологических комплексов, показатели для оценивания срока службы и остаточного ресурса мобильных метрологических комплексов. Определены основные соотношения для расчета показателей с учетом возможных рисков от возникновения скрытых метрологических отказов.

Представленные в статье выводы адресованы метрологам для повседневной эксплуатации мобильных метрологических комплексов. Установленные в исследовании показатели, критерии и признаки могут быть использованы при оценивании состояния, обосновании и продлении ресурса мобильных метрологических комплексов с учетом рисков от возникновения скрытых метрологических отказов.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, метрологическое обеспечение, определение срока службы, остаточный ресурс оборудования, мобильный метрологический комплекс

Принятые сокращения: ММК – мобильные метрологические комплексы; РЭ (СИ) – рабочие эталоны / средства измерений, ТО – техническое обслуживание РЭ (СИ).

Для цитирования: Ефремов А. С., Михайлов Е. А., Окрепилов М. В. Критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 112–123. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>

Статья поступила в редакцию 16.09.2025; одобрена после рецензирования 03.12.2025; принята к публикации 25.12.2025.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

Limiting State Criteria for Mobile Metrological Complexes

Andrey S. Efremov¹ , Evgeny A. Michaylov¹ , Mikhail V. Okrepilov² 

¹ A. F. Mozhaysky Military-Space Academy, St. Petersburg, Russia
 vka@mil.ru

² D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

Abstract: Mobile metrological complexes operate primarily outdoors, under high-intensity operational loads and constantly changing application conditions. A key factor in ensuring their functionality is the well-founded determination of their residual service life.

However, the criteria for assessing the limiting state of the working standards and measuring instruments within them are not always fully evident for justifying the residual service life of mobile metrological complexes. While a significant number of scientific publications address the metrological reliability of such measuring instruments, the issues of defining their limiting state and assessing the residual service life of mobile metrological complexes are not fully resolved and require further development.

The presented study aimed to justify the criteria for the limiting state of mobile metrological complexes based on a risk-oriented approach.

Risks were identified through an analysis of the design and functional features of mobile metrological complexes across the triad of subsystems: transport, measurement, and support. Mathematical calculations of the indicators and criteria for the limiting state of mobile metrological complexes were performed. These indicators and criteria are based on accounting for the level of risk from latent metrological failures of measuring instruments during inter-verification intervals.

An approach to determining risk indicators has been substantiated, taking into account the dynamic variations in the metrological characteristics of working standards and measuring instruments during operation. Indicators and criteria for the onset of the limiting state of mobile metrological complex subsystems have been established, along with indicators for assessing their service life and residual resource. The core mathematical relationships for calculating these indicators have been defined, considering potential risks from latent metrological failures.

The conclusions presented in the article are intended for metrologists involved in the daily operation of mobile metrological complexes. The indicators, criteria, and characteristics established in this study can be used to assess the condition, justify decisions, and extend the service life of mobile metrological complexes, while considering potential risks from latent metrological failures.

Keywords: risk-based approach, metrological support, determination of service life, residual equipment resource, mobile metrological complex

Abbreviations used: MMC – Mobile Metrological Complexes; WS (MI) – Working Standards / Measuring Instruments, TM – Technical Maintenance of WS (MI).

For citation: Efremov AS, Michaylov EA, Okrepilov MV. Limiting state criteria for mobile metrological complexes. *Measurement Standards. Reference Materials.* 2025;21(4):112–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>

The article was submitted 16.09.2025; approved after reviewing 03.12.2025; accepted for publication 25.12.2025.

Введение

Мобильные метрологические комплексы (ММК) выполняют поверки и текущие ремонты рабочих эталонов и средств измерений (РЭ (СИ)) по месту их эксплуатации в различных климатических и географических условиях, на промышленных объектах в условиях непрерывного производства, в том числе – оборонного [1].

Последствия воздействия негативных факторов, ускоряющих физический износ ММК, можно сгруппировать следующим образом:

- старение и коррозия механических и электромеханических элементов и узлов: ММК эксплуатируются преимущественно на открытом воздухе, вне помещений, в условиях существенной разности температур и влажности воздуха;

- ухудшение параметров технического состояния, снижение надежности оборудования: срок службы большинства ММК превышает 20–25 лет;

- ограничение возможностей оперативного восстановления оборудования ММК: постепенно изготовители снимают с производства отдельные комплектующие, в следствие чего существенно возрастают стоимость и сроки ремонтно-восстановительных работ.

Существует и такой фактор, как разница фактической загрузки ММК, следствием которого является невозможность (а) обобщить фактически израсходованный ресурс при одинаковых или близких значениях назначенных показателей долговечности и на этом основании

(б) обосновать уровень рисков от скрытых метрологических отказов средств измерений на межповерочных интервалах.

Обоснованное определение предельного состояния ММК обеспечивает его эффективное функционирование, а также планирование ресурсов и сроков службы, мероприятия по продлению назначенного срока службы.

Цель исследования – обосновать критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов на основе риск-ориентированного подхода к анализу функционирования подсистем ММК.

Задачи исследования:

- 1) дать характеристику рискам каждой подсистемы (транспортной, измерительной, обеспечивающей);

- 2) определить состав и содержание критериев и показателей предельного состояния подсистем мобильных метрологических комплексов;

- 3) определить соотношения для расчета показателей с учетом возможных рисков от возникновения скрытых метрологических отказов.

Анализ особенностей ММК

В состав ММК, как правило, входят три основные подсистемы (рис. 1), включающие транспортное средство, системы обеспечения, а также оснащенные рабочие места специалистов по поверке и ремонту СИ.

Транспортное средство ММК чаще строится на базе грузового автомобильного шасси с кузовом-фургоном. В состав обеспечивающих подсистем ММК входят средства энергообеспечения

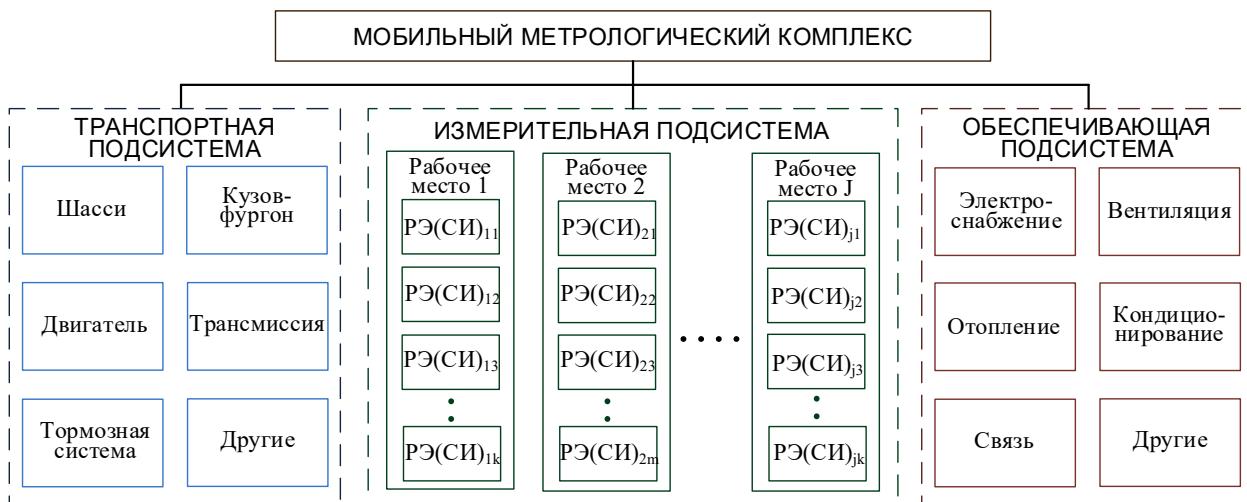


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Состав мобильного метрологического комплекса

Fig. 1. Composition of a mobile metrological complex

ММК, средства вентиляции, кондиционирования и отопления, средства контроля условий работы, средства связи. Рабочие места (РМ) по поверке и ремонту СИ обычно формируются по подгруппам СИ в зависимости от вида измеряемых величин: РМ по поверке и ремонту СИ геометрических величин; механических величин; давления и вакуума; электрических и магнитных величин; радиотехнических и радиоэлектронных величин; времени и частоты и др.

Соответственно, состав ММК может быть formalизовано представлен в виде совокупности трех функциональных подсистем, каждая из которых характеризуется набором параметров:

$$Z_{\text{ММК}} = \langle Z_{\text{TC}}, Z_{\text{OC}}, Z_{\text{ИС}} \rangle, \quad (1)$$

где Z_{TC} – множество параметров, характеризующих тип и структуру транспортной базы ММК; Z_{OC} – множество, характеризующее состав и структуру обеспечивающих подсистем в составе ММК; $Z_{\text{ИС}}$ – множество параметров, характеризующих измерительную подсистему (типы и состав РМ по поверке и ремонту СИ).

Для выбора номенклатуры показателей надежности приведем анализ особенностей ММК по ряду признаков в соответствии с ГОСТ 27.003-2016¹.

¹ ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

ММК относятся к объектам, имеющим несколько вариантов применения, что обусловлено наличием в их составе нескольких различных рабочих мест по поверке и ремонту СИ. С точки зрения режимов применения ММК является объектом многократного применения.

По характеру основных процессов, определяющих переход в предельное состояние, в составе ММК имеются как стареющие, так и изнашиваемые подсистемы.

Отказы или переход в предельное состояние ММК, как правило, не приводят к последствиям катастрофического характера (угрозе жизни и здоровью людей, значительным экономическим потерям и т. п.). Степень критичности в зависимости от последствий может быть определена применительно к конкретному режиму и условиям применения ММК.

По возможности восстановления работоспособного состояния после отказов в процессе эксплуатации ММК относятся к восстанавливаемым объектам. Большинство подсистем ММК являются ремонтируемыми, причем для различных подсистем может использоваться как обезличенный, так и необезличенный способ ремонта. ММК являются обслуживающими в процессе эксплуатации объектами. Предусмотрены различные виды контроля технического состояния подсистем ММК.

По числу возможных состояний ММК является объектом, для которого возможно деление

технических состояний по степени частичной работоспособности, отличающихся уровнем эффективности применения.

С учетом указанных факторов в качестве обобщенного показателя надежности ММК может быть использован коэффициент сохранения эффективности функционирования, характеризующий влияние состояния составных частей ММК на эффективность применения ММК по назначению:

$$K_{\text{эфф}}(T) = \frac{V(T)}{V_0(T)}, \quad (2)$$

где $V_0(T)$ – значение показателя эффективности применения объекта по назначению при отсутствии отказов; $V(T)$ – в случае отказов некоторой части элементов за определенную продолжительность эксплуатации T .

При этом эффективность применения объекта по назначению определяется через величину производимого выходного полезного эффекта в течение периода эксплуатации в определенных условиях. Понятие «выходного полезного эффекта» для ММК может быть определено, например, через количество (объем) и/или стоимость правильно выполненных работ по поверке и ремонту СИ. При этом работы по поверке (ремонту) СИ считаются выполненными правильно, если при их выполнении использовались работоспособные и метрологически исправные средства поверки, т. е. метрологические характеристики используемых РЭ и вспомогательных СИ не выходили за установленные границы.

В соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021² под предельным состоянием понимается состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Недопустимость или нецелесообразность дальнейшей эксплуатации либо восстановления объекта устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта. Под критерием предельного состояния при этом понимается признак или совокупность признаков,

² ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

В целях определения предельного состояния все множество возможных состояний ММК может быть разбито на два подмножества: 1) подмножество работоспособных состояний – когда величина коэффициента сохранения эффективности не менее допустимого; 2) подмножество неработоспособных состояний – противный случай.

С учетом особенностей ММК как объекта эксплуатации для подсистем ММК целесообразно различать два вида предельных состояний: 1) предельное состояние до ремонта (среднего или капитального), в ходе которого происходит восстановление ресурса; 2) предельное состояние до списания. В первом случае предусматривается временное прекращение применения объекта по назначению, а во втором – окончательное. Признаки достижения предельного состояния первого и второго вида во многом схожи, оба основываются, прежде всего, на определении фактического технического состояния объектов. Критерии предельного состояния, как правило, в большей степени базируются на некотором условии обеспечения требуемой эффективности функционирования, а выбор между ремонтом или списанием основывается на анализе технико-экономической целесообразности, а также производится с учетом организационно-технических и технологических возможностей по обеспечению запасными частями и ремонту [2, 8–10].

Исходя из состава ММК как совокупности подсистем очевидна возможность как раздельного восстановления ресурса или списания отдельных составных частей ММК (средств, узлов, подсистем) при достижении предельного состояния, так и ММК в целом. Поэтому можно говорить о предельных состояниях, их признаках и критериях как применительно к отдельным подсистемам и средствам, так и по отношению к ММК в целом.

Измерительная подсистема ММК

Выполнение целевых задач ММК по метрологическому обслуживанию СИ обеспечивается измерительной подсистемой. В ее состав входит несколько РМ, каждое из которых

предназначено для поверки и ремонта СИ определенных видов. В состав каждого РМ входят средства поверки: РЭ, вспомогательные СИ и другие технические средства. При анализе особенностей построения и функционирования измерительной подсистемы целесообразно провести анализ видов и последствий отказов РЭ (СИ) для идентификации и оценки рисков в соответствии с положениями ГОСТ Р 58771–2019³.

Характерной особенностью средств измерений является возможность возникновения отказов двух видов: 1) технических (или неметрологических); 2) метрологических [2–8]. Под метрологическим отказом при этом понимается событие, состоящее в выходе метрологической характеристики РЭ (СИ) за установленные пределы. Метрологические отказы РЭ (СИ) происходят значительно чаще неметрологических. Метрологические отказы, как правило, являются следствием старения и износа элементов и узлов РЭ (СИ). Поэтому среди метрологических отказов преобладают постепенные отказы, для которых характерно относительно монотонное изменение одной или нескольких метрологических характеристик, значения которых определяют метрологическую надежность РЭ (СИ). Характер зависимости изменения метрологических характеристик во времени и скорость старения могут различаться [3–6].

Технические отказы РЭ (СИ) являются, как правило, явными, в то время как метрологические имеют скрытый характер. Метрологические отказы возможно выявить только при проводимых через установленные интервалы времени аттестациях (поверках) РЭ (СИ), в ходе которых определяются фактические значения метрологических характеристик РЭ (СИ). Если при этом в ходе очередной поверки не выявлено факта выхода метрологической характеристики за установленные пределы, то, как правило, не выполняется каких-либо мероприятий по управлению техническим состоянием РЭ (СИ). Только при обнаружении выхода метрологической характеристики за установленные границы проводятся

мероприятия по возвращению метрологической характеристики РЭ (СИ) в допустимые пределы (ремонт, замены, регулировки). Для большинства РЭ (СИ) характерным является продолжительный процесс эксплуатации в течение нескольких межповерочных интервалов, когда проводятся только периодический контроль состояния при поверке и плановое ТО и не проводится каких-либо мероприятий по управлению техническим состоянием.

Поскольку возникающий на межповерочном интервале метрологический отказ внешне никак не проявляется до очередной поверки, РЭ (СИ) продолжают применять, получая недостоверную измерительную информацию. В этом случае можно говорить о наличии рисков, обусловленных получением недостоверной информации и характеризующих возможный ущерб от ошибок 1-го и 2-го рода вследствие применения метрологически неисправных эталонов.

В ходе длительной эксплуатации в силу протекающих процессов старения и дрейфа метрологических характеристик вероятность возникновения отказов на межповерочных интервалах возрастает. Соответственно растут риски от использования недостоверной измерительной информации. Поэтому в основу формирования критериев предельного состояния РЭ (СИ) могут быть положены признаки, характеризующие неприемлемый уровень рисков от скрытых метрологических отказов, обусловленный недопустимым возрастанием вероятности возникновения скрытых отказов на межповерочных интервалах.

Если метрологическая исправность РЭ (СИ) характеризуется множеством параметров $x_k(t)$, $k = \overline{1, K}$, то вероятность безотказной работы РЭ (СИ) определяется нахождением всех параметров в областях их допустимых значений $\{x_k^{\text{доп}}\}$ и определяется произведением вероятностей нахождения всех метрологических характеристик в их допустимых областях:

$$P_{\text{рэ(си)}}(t) = P_{\text{рэ(си)}} \left(x_k(t) \in \{x_k^{\text{доп}}\}, k = \overline{1, K} \right) = \\ = \prod_{k=1}^K P \left(x_k(t) \in \{x_k^{\text{доп}}\} \right). \quad (3)$$

³ГОСТ Р 58771–2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска.

При допущениях о том, что метрологическая исправность РЭ (СИ) характеризуется одной монотонно возрастающей метрологической характеристикой, вероятность безотказной работы РЭ (СИ) определяется вероятностью невыхода этой характеристики за установленный предел на соответствующем интервале времени [2, 4]:

$$P_{\text{п}(\text{си})}(t) = P_{\text{п}(\text{чи})}(\tau > t) = P_{\text{п}(\text{чи})}\{x(t) \leq x_{\text{пп}}\}, \quad (4)$$

где τ – наработка от начального момента до возникновения отказа; $P_{\text{з}(\text{чи})}(t)$ – вероятность безотказной работы; $P_{\text{п}(\text{чи})}\{x(t) \leq x_{\text{пп}}\}$ – вероятность невыхода МХ $x(t)$ за установленный предел $x_{\text{пп}}$.

Изменение метрологической характеристики во времени представляет собой случайный процесс. Множество реализаций этого процесса в каждый момент времени характеризуется некоторым законом распределения плотности вероятности, который отображает рассеяние значений реализаций случайного процесса [2–10].

Значение вероятности невыхода метрологической характеристики за установленный предел определяется с помощью соотношения

$$P_{\text{п}(\text{чи})}\{x(t) \leq x_{\text{пп}}\} = 1 - \int_{x_{\text{пп}}}^{\infty} f(x(t)) dx. \quad (5)$$

Если плотность распределения описана нормальным законом распределения с математическим ожиданием и дисперсией

$$f(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x(t)}} \exp\left(-\frac{(x(t) - m_x(t))^2}{2D_x(t)}\right), \quad (6)$$

то вероятность невыхода метрологической характеристики за установленный предел определяется через функцию Лапласа $\Phi[z]$ с аргументом

$$z = \frac{(x(t) - m_x(t))}{\sqrt{D_x(t)}}. \quad (7)$$

Наиболее простой является линейная модель тренда метрологической характеристики вида, когда изменение параметра системы линейно зависит от скорости изменения параметра

$$x(t) = x_0 + at, \quad (8)$$

где x_0 – значение метрологической характеристики на момент начала наблюдения; a – коэффициент, характеризующий скорость изменения метрологической характеристики, определяемый интенсивностью старения и износа элементов и узлов РЭ (СИ).

Если начальный параметр x_0 имеет рассеяние относительно среднего значения m_0 с дисперсией D_0 , то характеристика $x(t)$ для каждого значения времени t распределена по нормальному закону с математическим ожиданием и дисперсией

$$\begin{aligned} m_x(t) &= m_0 + at, \\ D_x(t) &= D_0 + a^2 t^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где m_a и D_a – среднее значение и дисперсия скорости изменения метрологической характеристики. Выражения (9) упрощаются для некоторых частных случаев, например, когда $m_0 = 0$ или $D_0 = 0$.

Помимо линейной зависимости для описания динамики изменения метрологических характеристик во времени могут быть использованы и другие функции, например, степенные экспоненциальные [3–6].

Критерий достижения предельного состояния РЭ (СИ) можно определить как снижение вероятности безотказной работы на межповерочном интервале до некоторого предельно допустимого уровня. В качестве показателя долговечности при этом могут быть использованы гамма-процентный ресурс (или срок службы) t_γ – наработка (срок службы) объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$P_{\text{п}(\text{чи})}[t < t_\gamma] = \frac{\gamma}{100\%}. \quad (10)$$

В этом случае при заданных требованиях к вероятности невыхода МХ за установленный предел необходимо определить срок службы, обеспечивающий заданный уровень безотказности. Т. е. искомым является значение времени, которое входит в аргумент табулированной функции Лапласа. Аргумент функции Лапласа является квантилем нормального распределения, т. е. значением, которое соответствует заданной вероятности.

Вероятность безотказной работы для каждого РМ может быть определена исходя из допущения о последовательном соединении в смысле надежности средств, входящих в состав рабочего места, выражением

$$P_{\text{PM}}(t) = \prod_{j=1}^J P_{\text{пэ(си)}_j}(t), \quad (11)$$

где J – количество РЭ (СИ) в составе данного РМ.

В составе измерительной подсистемы несколько РМ по поверке и ремонту функционируют независимо друг от друга, выполняя задачи по обслуживанию разных видов РЭ (СИ). Т. е. измерительная подсистема имеет канальный принцип построения, где каналы (РМ) не резервируют друг друга, но выходной полезный эффект W определяется суммированием эффектов W_i ($i = \overline{1, J}$) от каждого РМ. При различной важности результатов функционирования РМ данное обстоятельство может быть учтено введением весовых коэффициентов. Отказ одного или нескольких РМ не приводит к отказу всей измерительной подсистемы, а характеризуется лишь снижением эффективности функционирования.

Если величина создаваемого полезного эффекта прямо пропорциональна продолжительности времени безотказного функционирования РМ, то за некоторый интервал времени T_n полезный эффект от функционирования измерительной подсистемы с учетом возможных отказов РМ может быть определен как

$$W(T_n) = \sum_{i=1}^J W_i(T_n) = \sum_{i=1}^J w_i \tau_i(T_n), \quad (12)$$

где w_i – удельный (в единицу времени) полезный эффект i -го РМ; $\tau_i(T_n)$ – продолжительность нахождения i -го РМ в работоспособном и метрологически исправном состоянии за интервал эксплуатации T_n .

Полагая, что за интервал времени $\tau_{\text{отк}_i}(T_n)$ эксплуатации РМ после скрытых метрологических отказов РЭ (СИ) до их обнаружения при очередной поверке полезный эффект не производится, средний размер ущерба $U_i(T_n)$ на межповерочном интервале T_n может быть оценен через недополученный полезный эффект:

$$U_i(T_n) = w_i \tau_{\text{отк}_i}(T_n) = w_i (T_n - \tau_{0_i}(T_n)), \quad (13)$$

где $\tau_{0_i}(T_n)$ – среднее время безотказной работы i -го РМ на интервале T_n .

Таким образом, целесообразно характеризовать:

- качество функционирования измерительной подсистемы – размером создаваемого полезного эффекта;

- влияние отказов на снижение эффективности функционирования – размером ущерба и уровнем риска.

Уровень риска R определяется величиной ущерба U от недостоверных измерений и вероятностью возникновения такого события, т. е. вероятностью возникновения метрологических отказов на межповерочном интервале $Q(T_n)$:

$$R_i(T_n) = U_i(T_n)Q_i(T_n). \quad (14)$$

В качестве меры риска измерительной подсистемы в целом можно использовать среднее значение суммарного ущерба:

$$R(T_n) = U_{\text{cp}}(T_n) = \sum_{i=1}^J U_i(T_n)Q_i(T_n). \quad (15)$$

Признаками достижения предельного состояния РМ и измерительной подсистемы можно считать снижение эффективности функционирования, характеризуемое достижением неприемлемого уровня риска от недостоверных измерений.

Применительно к РМ критерий предельного состояния может быть определен через требование к значению вероятности безотказной РМ $P_{\text{PM}}(t)$ на межповерочном интервале, при котором еще обеспечивается приемлемый уровень риска $R_{\text{PM пред}}(T_n)$. Если построить логико-вероятностную функцию зависимости суммарного ущерба от вероятностей отказов РМ, то можно определить вероятность недостижения предельного состояния измерительной подсистемой, определяемого допустимым уровнем риска:

$$P_{\text{ИС}}(t): R(T_n) \leq R_{\text{пред}}. \quad (16)$$

Транспортная и обеспечивающая подсистемы ММК

Для транспортной и обеспечивающей подсистем ММК, которые являются восстанавливаемыми техническими объектами, при определении предельного состояния целесообразно применять известные подходы с учетом структурных схем надежности рассматриваемых подсистем [1].

Транспортное средство ММК должно удовлетворять множеству требований в части работы двигателя, трансмиссии, тормозной системы, рулевого управления, электрооборудования, целостности рамы, кузова и пр., а также в части соответствия требованиям безопасности дорожного движения и экологичности. В общем случае признаками предельного состояния автомобиля могут быть неустойчивое нарушение требований безопасности, неустойчивый выход технических характеристик за допустимые пределы, недопустимое снижение эффективности эксплуатации.

При продолжительной эксплуатации автомобиля его агрегаты и детали подвержены различным механическим, температурным и химическим воздействиям. Вследствие этого происходят процессы изнашивания, старения и коррозии его агрегатов и деталей, что приводит к возрастанию интенсивности отказов и влечет за собой рост удельных эксплуатационных затрат. Поэтому признаками предельного состояния до ремонта автомобиля считают, например, неустойчивый в условиях эксплуатации отказ одного из агрегатов. При этом предельное состояние до списания обычно связывают с выходом из строя одного или нескольких наиболее крупных и дорогих составляющих (кузова, двигателя, агрегатов трансмиссии), при котором ремонт их становится экономически нецелесообразным.

Для обеспечивающих подсистем (энергоснабжения, отопления, кондиционирования и др.) их выходной эффект оценивают выработкой заданного количества полезного эффекта (электроэнергии, тепла и пр.) за заданное время с установленными параметрами качества. Поэтому признаки достижения предельного состояния могут быть заданы через параметры выходного эффекта или соответствующее недопустимое снижение безотказности или готовности.

При определении критериев предельного состояния транспортной и обеспечивающей подсистем в качестве показателей можно применять вероятности $P_{TC}(t)$ и $P_{OC}(t)$ недостижения предельного состояния, которое определяется перечисленными выше признаками.

Критерии и признаки наступления предельного состояния ММК

В качестве показателя степени достижения предельного состояния ММК может быть использована логико-вероятностная функция, полученная на основе анализа структурно-функционального построения ММК. Транспортная подсистема обеспечивает необходимое при эксплуатации ММК свойство мобильности. Функционирование подсистемы обеспечения создает условия, необходимые для нормальной работы оборудования и персонала рабочих мест. Измерительная подсистема, состоящая из рабочих мест по аттестации (проверке) и ремонту РЭ (СИ), обеспечивает собственно выполнение целевых задач ММК по метрологическому обслуживанию РЭ (СИ). Исходя из этого, можно полагать, что предельное состояние ММК наступает при достижении предельного состояния хотя бы одной из подсистем:

$$S_{MMK} = S_{TC} \vee S_{OC} \vee S_{IC}, \quad (17)$$

где S_{MMK} – событие достижения предельного состояния ММК; S_{TC} , S_{OC} , S_{IC} соответственно – события достижения предельного состояния транспортной, обеспечивающей и измерительной подсистемами.

Если определены вероятности недостижения предельного состояния подсистемами ММК, то функция вероятности недостижения предельного состояния ММК имеет вид

$$P_{MMK}(t) = P_{TC}(t) \cdot P_{OC}(t) \cdot P_{IC}(t), \quad (18)$$

где P_{MMK} – вероятность недостижения предельного состояния ММК; P_{TC} , P_{OC} , P_{IC} соответственно – вероятности недостижения предельного состояния транспортной, обеспечивающей и измерительной подсистемами.

Критерий недостижения предельного состояния ММК можно определить с учетом допустимого уровня риска ущерба через граничные значения вероятности недостижения предельного состояния ММК:

$$G: P_{MMK}(t) \geq P_{MMK_{\text{пред}}} \Rightarrow R(t) \leq R_{\text{пред.}} \quad (19)$$

Условие недостижения предельного состояния ММК может быть также дополнено частными требованиями к вероятностям недостижения предельного состояния каждой из подсистем.

Заключение

В исследовании обоснованы критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов на основе риск-ориентированного подхода к анализу транспортной, измерительной, обеспечивающей подсистем ММК.

Анализ конструктивных особенностей ММК проведен в триаде.

К основным рискам транспортной подсистемы отнесены неустойчивый в условиях эксплуатации отказ одного из агрегатов.

Риски измерительной системы состоят в возникновении скрытых метрологических отказов РЭ (СИ) на межповерочных интервалах.

Главный вывод исследования заключается в обосновании подхода к определению показателей рисков с учетом динамики изменения метрологических характеристик рабочих эталонов и средств измерений в процессе эксплуатации.

Рассмотренные показатели, критерии и признаки могут быть использованы при оценивании метрологической надежности, а также при прогнозировании остаточного ресурса метрологических комплексов и средств измерений. С применением рассмотренных показателей возможно решать задачи оценивания состояния и продления ресурса ММК на основе риск-ориентированного подхода с учетом возможных рисков от возникновения скрытых метрологических отказов РЭ (СИ) на межповерочных интервалах.

Вклад авторов: Все авторы внесли вклад в концепцию и дизайн исследования. Ефремов А. С. – определение замысла и методологии статьи, анализ литературы, проведение математических исследований, работа с текстом статьи; Михайлов Е. А. – обработка экспериментальных данных, анализ результатов, участие в общем редактировании статьи;

Окрепилов М. В. – концепция и инициирование исследований, методическая поддержка, участие в общем редактировании статьи.

Contribution of the authors: All authors contributed to the research concept and design. Efremov A. S.– conceptualization and methodology of the article, literature analysis, conducting mathematical research, writing the original draft; Michaylov E. A.– experimental data processing, analysis of the results, participation in the general editing of the article; Okrepilov M. V.– research concept and initiation, methodological support, participation in the general editing of the article.

Конфликт интересов: Окрепилов М. В. является членом редакционной коллегии журнала «Эталоны. Стандартные образцы», но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Conflict of interests: Okrepilov M. V. is a member of the Editorial Board of the journal «Measurement Standards. Reference Materials» but was not involved in the decision to publish this article. The article underwent the journal's standard peer-review process. No other conflicts of interest were declared by the authors. The remaining authors declare no conflict of interest requiring disclosure in this article.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: The research did not receive any specific grant from any organization in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопишин В. Н., Кабатов В. В. Мобильные метрологические комплексы на страже боевой готовности вооружения и военной техники // Материально-техническое обеспечение вооруженных сил Российской Федерации. 2023. № 8. С. 56–61.
2. Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов [и др.]. СПб. : Лань, 2016. 352 с.
3. Определение интервала между аттестациями эталона на основании модели процесса измерений во времени / Р. А. Тетерук [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 4. С. 20–35. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>

4. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
5. Сулаверидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Метрологическая надежность средств измерений и оценка риска метрологического отказа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2023. Т. 29, № 4. С. 574–585. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2023.04.pp.574–585>
6. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. СПб. : НПО «Профессионал», 2008. 284 с.
7. Сергеев А. Г., Терегера В. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для вузов. М. : Юрайт, 2011. 820 с.
8. Оценка показателей долговечности радиоэлектронных устройств / М. А. Карапузов [и др.] // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 7. С. 36–40.
9. Михайлов Е. А., Мищенко В. И., Пермяков А. П. Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 40–45. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2024-4-5>
10. Щеглов Д. М. Применение риск-ориентированного подхода к оценке влияния погрешности измерений параметров объекта на эффективность его испытаний // Вестник метролога. 2019. № 2. С. 15–19.

REFERENCES

1. Prokopishin VN, Kabatov VV. Mobile metrological complexes that guard the combat readiness of weapons and military equipment. *Logistical support of the Russian Federation*. 2023;8:56–61. (In Russ.).
2. Dorokhov AN, Kernozhitsky VA, Mironov AN, Shestopalova OL. *Ensuring the reliability of complex technical systems*. St. Petersburg: Lan; 2016. 352 p. (In Russ.).
3. Teteruk RA, Firsanov NA, Pimenova AA, Koksharov AA. Determination of an interval between certifications of the standard based on the measurement process model in time. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(4):20–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>
4. Novitsky PV, Zograf IA. *Estimation of measurement errors*. 2nd ed., revised. and add. Leningrad: Ehnergoatomizdat Leningradskoe otdelenie; 1991. 304 p. (In Russ.).
5. Sulaberidze VSh, Neklyudova AA. Metrological reliability of means of measurements and assessment of the risk of metrological failure. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2023;29(4):574–585. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2023.04.pp.574–585>
6. Freedman AE. *Fundamentals of metrology. Modern course*. St. Petersburg: NPO «Professional»; 2008. 284 p. (In Russ.).
7. Sergeev AG, Teregera VV. *Metrology, Standardization, and Certification: Textbook for Higher Education Institutions*. Moscow: Yurayt; 2011. 820 p. (In Russ.).
8. Karapuzov MA, Polessky SN, Ivanov IA, Korolev PS. Evaluation of the durability of radioelectronic devices. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2015;9(7):36–40. (In Russ.).
9. Mikhailov EA, Mishchenko VI, Permyakov AP. Analysis of existing approaches to substantiate the service life of metrological complexes. *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;4:40–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2024-4-5>
10. Shcheglov DM. Application of a risk-based approach to assessing the impact of measurement errors of object parameters on the effectiveness of its tests. *Bulletin of the Metrologist*. 2019;2:15–19. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ефремов Андрей Станиславович – канд. техн. наук, преподаватель кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13
e-mail: vka@mil.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey S. Efremov – Cand. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Metrological Support of Weapons, Military and Special Equipment, A. F. Mozhaysky Military-Space Academy

13 Zhdanovskaya st., St. Petersburg, 197198, Russia
e-mail: vka@mil.ru

Михайлов Евгений Александрович – адъюнкт кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13
e-mail: vka@mil.ru

Окrepилов Михаил Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по качеству и образовательной деятельности ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: m.v.okrepilov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9815-1795>

Evgeny A. Michaylov – Adjunct of the Department of Metrological Support of Weapons, Military and Special Equipment, A. F. Mozhaysky Military-Space Academy

13 Zhdanovskaya st., St. Petersburg, 197198, Russia
e-mail: vka@mil.ru

Mikhail V. Okrepilov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director of Quality and Educational Activity, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: m.v.okrepilov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9815-1795>