

УДК 389.14

doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Е. А. Михайлов<sup>1</sup>, В. И. Мищенко<sup>2</sup>, А. П. Пермяков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,2,3</sup> vka@mil.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Проведен анализ работ, посвященных изучению существующих подходов к обоснованию срока службы сложных технических систем. *Материалы и методы.* Проведено обоснование, что одним из перспективных направлений моделирования процессов функционирования сложных технических систем являются теории полумарковских процессов, позволяющие учесть все многообразие вероятностных процессов сопровождающих эксплуатацию метрологических комплексов. Определено, что характеристика подходов к функционированию метрологических комплексов на протяжении жизненного цикла должна базироваться на выборе требуемого срока службы. Предложен процесс определения требуемого срока службы метрологических комплексов путем выбора оптимальных параметров стратегии метрологического обслуживания. *Результаты и выводы.* Применение данной стратегии позволит увеличить срок службы метрологических комплексов.

**Ключевые слова:** метрологические комплексы, срок службы, стратегия метрологического обслуживания, полумарковский процесс

**Для цитирования:** 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. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5

## ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO SUBSTANTIATING THE SERVICE LIFE OF METROLOGICAL COMPLEXES

E.A. Mikhaylov<sup>1</sup>, V.I. Mishchenko<sup>2</sup>, A.P. Permyakov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

<sup>1,2,3</sup> vka@mil.ru

**Abstract.** *Background.* The article analyzes the works devoted to existing approaches to substantiating the service life of complex technical systems. *Materials and methods.* The substantiation is carried out that one of the promising areas of modeling the processes of functioning of complex technical systems are the theories of semi-Markov processes, which allow taking into account all the variety of probabilistic processes accompanying the operation of metrological complexes. It is determined that the characteristic of approaches to the functioning of metrological complexes throughout the life cycle should be based on the choice of the required service life. The process of determining the required service life of the metrological complexes is proposed by selecting the optimal parameters of the metrological maintenance strategy. *Results and conclusions.* The application of this strategy will increase the service life of metrological complexes.

**Keywords:** metrological complexes, service life, strategy of metrological maintenance, semi-Markov process

**For citation:** Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I., Permyakov A.P. Analysis of existing approaches to substantiating the service life of metrological complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):40–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5

### Введение

Специфика метрологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации состоит в том, что она должна обеспечить поверку средств измерений из состава вооружения, военной и специальной техники (далее – ВВСТ). Это обуславливает необходимость наличия метрологических комплексов (далее – МК), которые должны служить столько, чтобы в рациональные сроки осуществить своевременное обслуживания ВВСТ. На стадии проектирования конструкторы

нормируют значения сроков службы МК в технических заданиях и технических условиях. При этом если долговечность МК будет значительно превышена по сравнению с тем сроком, в течение которого они будут использоваться, то это повлечет за собой уменьшение возможностей МК по поверке средств измерений. Исходя из сроков службы МК определяются нормы амортизационных отчислений, обеспечивающие их воспроизводство, а органы материально-технического обеспечения рассчитывают потребность в МК и необходимость его своевременной замены. Инженерно-техническая служба, эксплуатирующая МК, обосновывает потребность в ремонте машин и оборудования в течение всего срока использования, определяет необходимый объем ремонтных работ, рассчитывает потребность в запасных частях, обменном фонде составных частей комплекса, необходимой ремонтно-обслуживающей базе.

Существующие в настоящее время нормативные сроки службы МК в большинстве случаев не имеют под собой серьезного технического обоснования и являются отражением давно установленных в законодательном порядке обобщенных норм амортизационных отчислений на полное восстановление оборудования. Поэтому они могут и должны рассматриваться как граничный срок, при достижении которого должна быть объективно оценена возможность дальнейшей эксплуатации МК.

Фактическое техническое состояние МК и допустимые сроки их дальнейшего использования определяются условиями ее эксплуатации, периодичностью и качеством проведения ремонтов и технических обслуживаний и т.д. Перечисленные факторы являются индивидуальными, и их влияние на фактическое техническое состояние может быть оценено только на базе обследования каждого конкретного МК. Поэтому работы по обоснованию сроков эксплуатации должны предусматривать всестороннее, в том числе и инструментальными методами, определение условий эксплуатации каждого типа МК и их фактическое техническое состояние для выработки и осуществления мероприятий, в том числе и модернизации отдельных узлов, направленных на повышение эффективности дальнейшего использования МК. В процессе такой модернизации должна происходить замена изношенных и устаревших составных частей на новые, обеспечивающие повышение надежности и ремонтпригодности оборудования, улучшения систем управления, диагностики и др. [1].

Расхождение значений фактических и нормативных сроков службы вносит диспропорцию в организацию технического обслуживания. В этой связи обоснование сроков службы МК на основании исследования соотношения нормативных и фактических их сроков использования является актуальной проблемой.

Для МК отсутствует прямая связь сроков службы с годовой наработкой. Чаще всего применяют два показателя: амортизационный и фактический срок службы. Первый характеризует период полного переноса стоимости оборудования на производственную деятельность, а второй – время действительного его функционирования.

Анализ МК позволил установить, что значительное их количество, находящихся в эксплуатации, исчерпало свой нормативный срок службы. Действительные или фактические сроки службы превышают амортизационные сроки. Диспропорция сроков службы обусловлена спецификой эксплуатации МК, которое представляет собой восстанавливаемые объекты длительного применения. Текущие ремонты его проводят на месте эксплуатации заменой отказавших элементов запасными частями или агрегатами и узлами обменного фонда. Практика подтверждает отсутствие прямой связи его календарного срока службы с наработкой [2].

#### ***Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов***

Анализ существующих методов оценки и прогнозирования технического состояния, показателей надежности и остаточного ресурса для обоснования и продления срока службы МК показал, что решение этой научной задачи базируется на использовании следующих методов:

- методы, основанные на ускоренных испытаниях;
- методы, основанные на выявлении статистических закономерностей изменения определяющих параметров;
- метод индивидуального прогнозирования долговечности на основе статистической классификации;
- метод экстраполяции значений показателей эксплуатационной надежности.

**Методы ускоренных испытаний** основаны на форсировании режимов испытаний элементной базы радиоэлектронных средств относительно эксплуатационных путем ужесточения электрических режимов питания и нагрузки, ужесточения факторов окружающей среды, повышения интенсивности их работы (увеличение числа включений, сокращение времени простоев и т.п.).

Форсированные испытания в общем случае включают два этапа:

- предварительные испытания с целью выбора форсированного режима, оценки коэффициента ускорений испытаний и определения длительности испытаний;
- собственно, испытания исследуемых элементов в форсированном режиме.

При обосновании возможности продления срока службы элементов МК традиционно используются два подхода:

- производится статистическая оценка вероятности безотказной работы на требуемое время продления по результатам форсированных испытаний;
- осуществляется прогноз технического состояния элементов МК.

За счет проведения испытаний в форсированном режиме имитируются условия эксплуатации МК до достижения требуемой наработки или календарного срока. Затем осуществляется оценка технического состояния элементов МК и выработка решения на продление срока службы в соответствии с существующей методикой. Преимущество данной методики состоит в том, что она может быть использована при неизменных значениях технических параметров (отсутствии отказов).

Для применения метода ускоренных испытаний на долговечность в форсированном режиме необходимо иметь три выборки (две для предварительных испытаний), объем которых определяется в соответствии с выбранным процентом годных элементов МК и числом отказов. В качестве параметров форсирующих режимов выбираются повышенная температура и циклические включение и выключение источников питания.

Сложностью применения методов, основанных на ускоренных испытаниях для МК, является необходимость наличия представительных выборок по отказам МК, а также отсутствие модели отказов [3].

**Методы, основанные на выявлении статистических закономерностей изменения определяющих параметров.** Эти методы основаны на выявлении статистических закономерностей изменения определяющих параметров МК во времени с учетом условий и режимов эксплуатации, построении соответствующих математических моделей и прогнозировании на их основе моментов достижения параметрами границы поля допуска.

Выявление указанных закономерностей осуществляется по результатам наблюдения в течение некоторого периода времени за исследуемым МК при его эксплуатации (хранении), а также по данным испытаний выборки демонтированных изделий или их аналогов в условиях и режимах, имитирующих реальную эксплуатацию.

Рассмотрим метод прогнозирования показателей долговечности МК по запасу параметрической надежности.

Суть метода состоит в том, что партию изделий делят на несколько выборок с различными значениями определяющего технического параметра и определяют для них коэффициент, характеризующий запас параметрической надежности. Для каждой выборки (каждого значения коэффициента) вычисляют нижнюю границу срока службы. По полученным значениям строят зависимость и по данной зависимости определяют соответствующий остаточный срок службы.

Рассмотренный метод приемлем только для элементов МК, а не для образца в целом, и на исследование определяющих параметров необходим значительный период времени.

**Метод индивидуального прогнозирования долговечности** МК на основе статистической классификации изделий базируется на теории распознавания образов, в рамках которой предполагается наличие вероятностной связи между техническими параметрами изделия и его наработкой до отказа.

Метод прогнозирования включает две основные процедуры:

- обучения, при которой на основе накопленной ранее статистической информации, полученной по результатам эксплуатации или испытаний однотипных МК в сходных условиях и режимах, составляются описания классов изделий, отличающихся различной долговечностью;
- распознавания, при которой определяется принадлежность предъявляемого для прогнозирования изделия к одному из классов по долговечности.

Сложность применения данного метода заключается в необходимости обеспечения представительных выборок по отказам, позволяющих описать классы изделий, различающиеся по сроку службы. Данный метод применим только для изделий единичного применения.

**Метод экстраполяции значений показателей эксплуатационной надежности** состоит в выявлении тенденции изменения этих показателей группы однотипных МК в аппаратуре, аппроксимации изменений подходящими аналитическими функциями и использовании последних для прогнозирования показателей надежности на требуемый срок.

Решение на продление вырабатывается по результатам сопоставления прогнозируемых значений показателей с предельно допустимыми, которые устанавливаются в техническом задании на продление.

В качестве прогнозируемых показателей надежности рекомендуется использовать значение параметра потока отказов группы однотипных МК или значение интенсивности отказов.

Для реализации метода необходимо располагать следующей исходной информацией:

- при прогнозировании параметра потока отказов – текущими моментами возникновения отказов МК с указанием наработки аппаратуры;
- при прогнозировании интенсивности отказов МК – наработкой отказавших и не отказавших МК.

Достоинством метода в отличие от предыдущих является наличие модели отказов. Но для реализации данного метода необходим достаточный объем статистических данных для расчета моментов распределения наработки на отказ.

Еще одним подходом к обоснованию величины срока службы является моделирование процесса функционирования МК в течение всего жизненного цикла. Среди известных работ на эту тему перспективными являются работы профессоров В. И. Мищенко, Е. И. Сычева и Л. И. Волкова [4–6], базирующиеся на использовании теории полумарковских моделей. Но и в этих работах описывается не весь жизненный цикл, а только некоторая функция между соседними техническими обслуживаниями. При этом предполагается, что объект обслуживания после проведения обслуживания полностью восстанавливает свой ресурс. Кроме этого, в названных работах отсутствует учет интенсивности эксплуатации. А именно этот фактор является одним из основных, определяющих конечное значение срока службы.

В качестве направления моделирования процесса функционирования МК на протяжении жизненного цикла следует использовать подход, учитывающий интенсивность эксплуатации.

Наиболее перспективным подходом к функционированию МК на протяжении жизненного цикла является использование теории полумарковских процессов, позволяющих учесть все многообразие вероятностных процессов, сопровождающих эксплуатацию МК [7].

Характеристика подходов к функционированию МК на протяжении жизненного цикла должна базироваться на выборе требуемого срока службы в результате решения оптимизационной задачи максимизации комплексного коэффициента готовности как функции основных параметров стратегии метрологического обслуживания и срока службы:

$$T_{\text{сл}}^{\text{оптим}} = \arg \max_{X(N), T_{\text{имп}}(N), T_{\text{имп}}} K_{\Gamma}(P_{\text{МК}}, P_{\text{пэ}}, T_{\text{имп}}, T_{\text{имп}}(N), X(N), T_{\text{п}}, \alpha, \beta, T_{\text{в}}, K_{\text{и}}, T_{\text{сл}}),$$

где  $P_{\text{МК}}$  – вероятность возникновения метрологических отказов МК (с учетом возмущающих воздействий и деструктивных факторов);  $P_{\text{пэ}}$  – вероятность возникновения неисправности первичного эталона;  $T_{\text{имп}}$  – периодичность метрологического обслуживания МК;  $X(N)$  – матрица распределений РЭ по видам метрологического обслуживания;  $T_{\text{имп}}(N)$  – количество видов метрологических обслуживаний;  $T_{\text{п}}$  – продолжительность проведения поверки РЭ;  $\alpha, \beta$  – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода;  $T_{\text{в}}$  – средняя продолжительность восстановления МК;  $K_{\text{и}}$  – коэффициент интенсивности эксплуатации МК;  $T_{\text{сл}}$  – назначенный срок службы МК.

Процесс определения требуемого срока службы МК достигается путем выбора оптимального значения количества видов метрологических обслуживаний и матрицы распределения рабочих эталонов по видам метрологических обслуживаний.

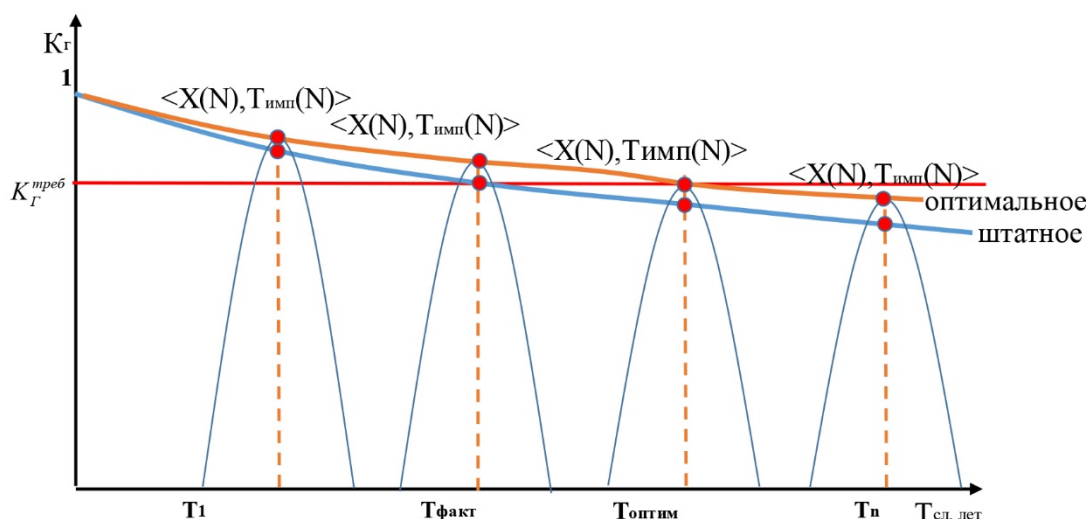


Рис. 1. Определение оптимального срока службы метрологического комплекса

На рис. 1 представлена зависимость срока службы МК (оптимальное и штатное значение) от коэффициента готовности. Для каждой выборки (каждого значения коэффициента готовности) вычисляют нижнюю границу срока службы. При проведении штатных метрологических обслуживаний значение коэффициента готовности примет значению срока службы  $T_{\text{факт}}$ , а при проведении оптимальной стратегии метрологического обслуживания значения коэффициента готовности примет значение срока службы  $T_{\text{оптим}}$ . Проведение оптимальной стратегии метрологического обслуживания позволит увеличить ресурс и эффективность работы МК.

### Заключение

В данной статье представлен анализ подходов к обоснованию срока службы сложных технических систем. Определено, что для описания процесса функционирования МК как сложной системы наиболее приемлемой является теория полумарковских процессов. В процессе функционирования МК необходимо выбрать такую оптимальную стратегию метрологического обслуживания, которая позволит увеличить срок службы и повысить эффективность их работы.

Таким образом, одним из принципов, обеспечивающих увеличение сроков службы МК, является обязательность их пересмотра в условиях технического перевооружения. Увеличение сроков службы оборудования способствует экономии материальных средств и рациональному использованию инвестиций в вооруженных силах.

### Список литературы

1. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника сервис, 2016. 218 с.
2. Шуенкин В. А., Донченко В. С. Прикладные модели теории массового обслуживания. Киев : НМК ВО, 1992. 398 с.
3. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.
4. Мищенко, В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
5. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.
6. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.
7. Мищенко В. И., Кравцов А. Н., Мамлеев Т. Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учетом периодичности поверки // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22–27.

### References

1. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politekhnik servis, 2016:218. (In Russ.)

2. Shuenkin V.A., Donchenko V.S. *Prikladnye modeli teorii massovogo obsluzhivaniya = Applied models of queuing theory*. Kiev: NMK VO, 1992:398. (In Russ.)
3. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
4. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politehnika-servis, 2016:218. (In Russ.)
5. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
6. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
7. Mishchenko V.I., Kravtsov A.N., Mamleev T.F. A semi-Markov model of the functioning of redundant measuring instruments, taking into account the frequency of verification. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021;(4):22–27. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### Евгений Александрович Михайлов

адъюнкт,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

##### Evgeny A. Michaylov

Adjunct,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

##### Владимир Ильич Мищенко

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры метрологического  
обеспечения вооружения военной и специальной  
техники, Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

##### Vladimir I. Mishchenko

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of metrological support  
of weapons, military and special equipment,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

##### Александр Петрович Пермяков

инженер контрольно-измерительной лаборатории,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

##### Aleksandr P. Permyakov

Engineer of the control and measuring laboratory,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 07.08.2024

Принята к публикации / Accepted 03.09.2024