

УДК 389.14
doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-3

МЕТОДИКА АДАПТАЦИИ СРОКА СЛУЖБЫ И ПАРАМЕТРОВ СТРАТЕГИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА К УРОВНЮ ЕГО НАДЕЖНОСТИ

Е. А. Михайлов¹, В. И. Мищенко²

^{1,2} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Существующие в настоящее время сроки службы мобильных метрологических комплексов 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 мобильных метрологических комплексов. *Материалы и методы.* Представлена методика адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности. *Результаты и выводы.* Данная методика позволяет рассчитать такой срок службы, который обеспечивает требуемое значение коэффициента готовности мобильного метрологического комплекса.

Ключевые слова: метрологические комплексы, срок службы, стратегия метрологического обслуживания, полумарковский процесс, поверочная интенсивность метрологических отказов

Для цитирования: Михайлов Е. А., Мищенко В. И. Методика адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 23–28. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-3

METHOD OF ADAPTATION OF THE SERVICE LIFE AND PARAMETERS OF THE METROLOGICAL MAINTENANCE STRATEGY OF A MOBILE METROLOGICAL COMPLEX TO THE LEVEL

E.A. Mikhaylov¹, V.I. Mishchenko²

^{1,2} Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

^{1,2} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The current service life of mobile metrological complexes in most cases does not have a serious technical justification and is a reflection of the generalized norms of depreciation charges for the complete restoration of equipment that have long been established by law. Therefore, they can and should be considered as a deadline, upon reaching which the possibility of further operation of the mobile metrological complexes should be objectively assessed. *Materials and methods.* The article presents a method for adapting the service life and parameters of the metrological maintenance strategy of a mobile metrological complex to its reliability level. *Results and conclusions.* This method allows calculating such a service life that ensures the required value of the readiness factor of the mobile metrological complex.

Keywords: metrological complexes, service life, metrological maintenance strategy, semi-Markov process, verification intensity of metrological failures

For citation: Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I. Method of adaptation of the service life and parameters of the metrological maintenance strategy of a mobile metrological complex to the level. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2025;(3):23–28. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-3

Введение

Существующие в настоящее время сроки службы мобильных метрологических комплексов (ММК) 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 ММК.

Срок службы ММК является важным аспектом, определяющим его эффективность и надежность в процессе обеспечения точности измерений. ММК, как правило, состоят из различных измерительных приборов и систем, которые должны функционировать в течение определенного времени, обеспечивая стабильность и достоверность результатов. Важно отметить, что срок службы ММК не является фиксированным значением, а зависит от множества факторов, включая качество используемых материалов, технологии производства, условия эксплуатации и регулярность метрологического обслуживания.

Решение задачи адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания (периодичности и продолжительности проведения аттестаций (поверок), проводимых в рамках всех вариантов метрологического обслуживания), обеспечивающей требуемый уровень готовности ММК, является актуальным и востребованным.

Анализ функционирования ММК и эксплуатационной документации на них показывает, что характерной особенностью его обслуживания является то, что оно сводится к двум мероприятиям, а именно: проведению ежедневного технического обслуживания (ЕТО) и проведению метрологического обслуживания. ЕТО – это как правило чистка, проверка на включение/выключение, протирка и пылеудаление, а метрологическое обслуживание – это аттестация эталонов и поверка средств измерений, входящих в рабочие места ММК и их ремонт. В то же время ММК по своим признакам является сложной системой со всеми соответствующими таким объектам свойствами.

Решение задачи адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности

Решение задачи адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания ММК к уровню надежности включает в себя решение следующих подзадач:

- 1) формирование множество значений срока службы;
- 2) формирование вариантов распределения аттестации (поверки) Э (СИ) по видам и периодам метрологического обслуживания для каждого значения срока службы;
- 3) расчет коэффициента готовности для каждого варианта и выбор максимального;
- 4) в случае превышения максимального значения коэффициента готовности, превышающего требуемое значение, выбирается следующее значение.

Решение вышеперечисленных подзадач осуществляется с помощью предлагаемой методики адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности, которая включает пять этапов [1, 2].

Первый этап – учет особенностей функционирования и структуры исследуемого ММК.

Выделим в исследуемом метрологическом комплексе:

1) $(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_L)$ – совокупность Э (СИ), готовность каждого из которых дает возможность судить о готовности всего ММК к выполнению возложенных на него функциональных задач, $i = \overline{1, L}$;

2) $(\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_L)$ – совокупность интенсивностей метрологических отказов i -го Э (СИ), указанных в формулярах на Э (СИ) ММК. Далее необходимо проранжировать совокупность интенсивностей метрологических отказов i -го Э (СИ) по убыванию.

Второй этап – подготовка исходных данных для расчета среднего времени пребывания Э (СИ) в работоспособном состоянии.

Введем булевы переменные:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й Э (СИ) добавляется к числу поверяемых,} \\ & \text{при } k\text{-м виде метрологического обслуживания, } i = \overline{1, L}, k = \overline{1, N}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где N – количество видов метрологического обслуживания.

Совокупность $\{x_{ik}\}$ образует матрицу назначений X .

Аналогично вышесказанному введем также понятие поверочной интенсивности метрологических отказов при проведении различных видов метрологического обслуживания k -го вида, которая рассчитывается через интенсивности метрологических отказов эталонов по формуле

$$\Lambda_k = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{ik}. \quad (1)$$

Производится вычисление по формуле (1) для каждого вида метрологического обслуживания:

$\Lambda_1 = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{i1} = L\lambda_1$ – интенсивность обнаружения отказов при проведении метрологического обслуживания 1-го вида (ЕТО);

$\Lambda_2 = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{i2}$ – интенсивность обнаружения отказов при проведении метрологического обслуживания 2-го вида, но не обнаруживаемых при проведении предыдущего метрологического обслуживания;

$\Lambda_N = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{iN}$ – интенсивность обнаружения отказов при проведении метрологического обслуживания N -го вида, но не обнаруживаемых при проведении всех предыдущих видов метрологического обслуживания.

Допустим, что периодичность каждого из видов метрологического обслуживания с большей полнотой является кратной периодичности проведения метрологического обслуживания аттестации (поверки) Э (СИ).

$(T_1, T_2, \dots, T_N)$ – совокупность периодов проведения метрологического обслуживания для различных по полноте видов метрологического обслуживания;

$(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$ – совокупность коэффициентов, устанавливающих соотношение между периодами соседних видов метрологического обслуживания, т.е.

$$Z_1 = \frac{T_2}{T_1}; Z_2 = \frac{T_3}{T_2}; \dots; Z_k = \frac{T_{k+1}}{T_k}; \dots; Z_{N-1} = \frac{T_N}{T_{N-1}}; Z_N = \frac{T_{\text{сп}}}{T_N}. \quad (2)$$

Третий этап – расчет коэффициента готовности ММК.

Рассчитаем значение коэффициента готовности для различных вариантов метрологического обслуживания, отличающихся периодичностью, объемом, сроком службы, и выберем вариант, имеющий наибольшее значение коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = \max_{Z, X, N, T_{\text{сп}}} K_{\Gamma}(Z, X, N, T_{\text{сп}}).$$

Рассмотрим безотказность ММК на временном интервале между соседними аттестациями (проверками) Э (СИ) 1-го вида метрологического обслуживания

$$[T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1}; T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1}], \quad (3)$$

где $T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1} = (l_N - 1)T_N + (l_{N-1} - 1)T_{N-1} + \dots + (l_k - 1)T_k + \dots + (l_1 - 1)T_1 = \sum_{k=1}^N (l_k - 1)T_k$ – момент времени, соответствующий окончанию l_1 -го метрологического обслуживания 1-го вида при условии, что до этого момента проведено l_2 метрологического обслуживания 2-го вида, ..., l_N метрологического обслуживания N -го вида;

$$T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1} = T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1} + T_1 = T_1 + \sum_{k=1}^N (l_k - 1)T_k; \quad (4)$$

– момент времени, соответствующий окончанию следующего $(l_1 + 1)$ -го по счету метрологического обслуживания 1-го вида.

С учетом коэффициентов (2) имеем

$$T_k = T_1 \prod_{S=1}^{k-1} Z_S, T_N = \frac{T_{\text{сп}}}{Z_N}, Z_N = \frac{T_{\text{сп}}}{T_1 \prod_{S=1}^{N-1} Z_S}. \quad (5)$$

Тогда с использованием соотношений (3)–(5) получим

$$T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1} = T_1^\Pi \sum_{k=1}^N (l_k - 1) \prod_{S=1}^{k-1} Z_S;$$

$$T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1} = T_1^\Pi \left[1 + \sum_{k=1}^N (l_k - 1) \prod_{S=1}^{k-1} Z_S \right]. \quad (6)$$

Определим вероятность безотказной работы эталонов и средств измерений ММК на интервале $[T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1}^\Pi; T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1}^\Pi]$. Для этапа нормальной эксплуатации (экспоненциальное распределение времени безотказной работы) имеем

$$P(T_{N,1}^\Pi; T_{N,1+1}^\Pi) = \exp[-\Lambda_N(T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,N}^\Pi)] \times \exp[-\Lambda_{N-1}(T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,1-1}^\Pi)] \times \dots$$

$$\times \exp[-\Lambda_k(T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,k}^\Pi)] \times \exp[-\Lambda_2(T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,2}^\Pi)] \times \dots$$

$$\times \exp[-\Lambda_1(T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,1}^\Pi)] = \exp\left[-\sum_{k=1}^N \Lambda_k(T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,k}^\Pi)\right],$$

где

$$T_{N,1+1}^\Pi = T_1^\Pi \left\{ 1 + \sum_{m=1}^N \left[(l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right] \right\};$$

$$T_{N,k}^\Pi = T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_k} = T_1^\Pi \sum_{m=1}^N \left[(l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right], k = (1, \dots, N). \quad (7)$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы на произвольном интервале между метрологическим обслуживанием 1-го вида

$$P_a(T_1^\Pi) = \exp(-\Lambda_1 T_1^\Pi) \exp(-\Lambda_2 T_1^\Pi (1 + (l_1 - 1) Z_1)) \times$$

$$\times \exp(-\Lambda_i T_1^\Pi (1 + (l_1 - 1) Z_1 + (l_2 - 1) Z_1 Z_2)) \times \dots$$

$$\times \exp\left\{-\Lambda_i T_1^\Pi \left[1 + (l_1 - 1) Z_1 + (l_2 - 1) Z_1 Z_2 + \dots + (l_N - 1) \prod_{S=1}^N Z_S \right]\right\} =$$

$$= \exp\left\{-T_1^\Pi \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=1}^L \lambda_i x_{ik} \left(1 + \sum_{m=1}^k (l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right) \right]\right\}. \quad (8)$$

Соответственно, вероятность возникновения отказа ММК равна

$$\overline{P_a(T_1)} = 1 - P_a(T_1).$$

Используя выражения (1) – (8), а также соотношение для коэффициента готовности, полученное в работах [3–5], определим наборы $\{x_{jk}\}$ и $\{Z_k\}$, $j = (1, \dots, L)$, $k = (1, \dots, N)$, которые обеспечивали бы наибольшую величину коэффициента готовности ММК в течение всего срока службы $T_{\text{сл}}$ в соответствии с выражением

$$K_\Gamma = \max_{Z, X, N, T_{\text{сл}}} \frac{T_p(Z, X, N, T_{\text{сл}})}{T_{\text{сл}}} = \frac{1}{T_{\text{сл}}} \max_{Z, X, N, T_{\text{сл}}} \{T_p(Z, X, N, T_{\text{сл}})\}, \quad (9)$$

где

$$T_p(Z, X, N, T_{\text{сл}}) = T_1 \sum_{l_N=1}^{Z_N} \sum_{l_{N-1}=1}^{Z_{N-1}} \dots \sum_{l_1=1}^{Z_1} \frac{1 - P_a(T_1^\Pi)}{A},$$

$$A = (T_1^\Pi + T_m^{\text{III}})(P_a(T_1^\Pi) + \overline{P_a}(T_1^\Pi) / D_m) + F T_{pk} P_a(T_1^\Pi) - \overline{P_a}(T_1^\Pi) T_B;$$

$$P_a(T_1^\Pi) = \exp\left\{-T_1^\Pi \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=1}^L \lambda_i x_{ik} \left(1 + \sum_{m=1}^k (l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right) \right]\right\}; \quad (10)$$

– среднее время пребывания ММК в работоспособном состоянии; $P_a(T_1^{\Pi})$ – вероятность безотказной работы ММК на интервале между соседними метрологическими обслуживаниями 1-го вида

$$T_m^{\Pi\Pi} = \sum_{i=1}^L T_i x_{im}; \quad (11)$$

– продолжительность метрологического обслуживания ММК при m -м виде метрологического обслуживания, где $m = (1, \dots, N)$ – вероятность обнаружения отказа ММК при m -м виде метрологического обслуживания:

$$\beta_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L \lambda_i x_{im}}{\sum_{i=1}^L \lambda_i}. \quad (12)$$

Оптимизация целевой функции (10) производится с учетом ряда естественных ограничений:

$$1. \sum_{k=1}^N x_{ik} = 1, i = (1, \dots, L). \quad (13)$$

Это ограничение учитывает требования обязательной поверки каждого Э (СИ) при каком-либо из видов метрологического обслуживания.

$$2. \sum_{k=1}^N x_{ik} \geq 1, k = (1, \dots, N). \quad (14)$$

Это ограничение означает, что при каждом виде метрологического обслуживания для поверки должен включаться хотя бы один из ранее не поверявшихся Э (СИ).

$$3. \sum_{i=1}^L T_i x_{ik} \leq T_{TP}^{\Pi\Pi}. \quad (15)$$

Это ограничение обусловлено тем, что продолжительность метрологического обслуживания регламентируется условиями проведения поверки.

$$4. Z_S > 0 - \text{целое.}$$

Решение этой сложной оптимизационной функции может быть получено при использовании метода поэтапной последовательной максимизации среднего времени пребывания в работоспособном состоянии и фиксированном значении срока службы, суть которого состоит в следующем. Вначале фиксируется число видов метрологического обслуживания. Далее в качестве начальной совокупности периодов обслуживания используется набор Э (СИ), реализуемый на практике для большинства ММК. При фиксированных $N, T_{\text{сл}}, Z$ осуществляется распределение аттестаций (поверок) Э (СИ) по видам метрологического обслуживания. Процедура является итерационной. Вначале обнуляется матрица $\{x_{ik}\}, k = (1, \dots, N), i = (1, \dots, L)$. На первом шаге присваивается значение единицы всем элементам первой строки, соответствующей первому виду метрологического обслуживания, т.е. $x_{i1} = 1, i = (1, \dots, L)$. На втором и последующих шагах последовательно присваивается значение единицы элементам матрицы $x_{i+1,k+1}, k = (1, \dots, N), i = (1, \dots, L)$, что соответствует перераспределению аттестаций (проверок) Э (СИ) по видам метрологического обслуживания и вычисляются приращения $\Delta T_p(x_{i1})$ целевой функции (9). Перераспределение аттестаций (проверок) продолжается до тех пор, пока $\Delta T_p(x_{i1}) > 0$. Здесь же производится вычисление значений коэффициента готовности K_G , его приращений ΔK_G , вариантов распределения аттестаций (поверок) Э (СИ) по видам метрологического обслуживания [6].

Процедура заканчивается при выполнении ограничений (13) и (14). После этого проверяется выполнение остальных ограничений (15).

Четвертый этап – отыскание рациональных значений $X, Z, N, T_{\text{сл}}$ по максимуму коэффициента готовности (9).

Пятый этап – в случае превышения максимального значения коэффициента готовности выбирается требуемое значение срока службы.

Расчет значения коэффициента готовности прекращается, когда наибольшее значение K_G как функции количества, видов, периодичности и объема метрологического обслуживания становится меньше требуемого. Тогда срок службы выбирается равным величине, полученной на предыдущем шаге.

Заключение

В данной статье представлена методика адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания ММК к уровню его надежности, оцениваемому коэффициентом готовности. Данная методика позволяет рассчитать такой срок службы ММК, который обеспечивает его требуемое значение коэффициента готовности.

Список литературы

1. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника сервис, 2016. 218 с.
2. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Гончаров А. П., Ткаченко П. А. Методика обоснования стратегии технического обслуживания мобильного метрологического комплекса на базе одномерной много-ярусной полумарковской модели // Вестник метролога. 2023. № 2. С. 12–17.
3. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В. Полумарковская модель процесса функционирования средств измерений // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 29–38. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
4. 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.
5. Шуенкин В. А., Донченко В. С. Прикладные модели теории массового обслуживания. Киев : НМК ВО, 1992. 398 с.
6. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.

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. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Goncharov A.P., Tkachenko P.A. Methodology for substantiating the strategy of maintenance of a mobile metrological complex based on a one-dimensional multi-tiered semi-Markov model. *Vestnik metrologa = Bulletin of the Metrologist*. 2023;(2):12–17. (In Russ.)
3. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V. The semi-Markov model of the process of functioning of measuring instruments. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):29–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
4. 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.)
5. Shuenkin V.A., Donchenko V.S. *Prikladnye modeli teorii massovogo obsluzhivaniya = Applied models of queueing theory*. Kiev: NMK VO, 1992:398. (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.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Александрович Михайлов

адъюнкт,
кафедра 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

Evgeny A. Michaylov

Adjunct,
sub-department of metrological support of weapons,
military and special equipment,
Mozhaisky Military Space Academy
(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,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 04.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025