

УДК 389.14
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-3

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В. А. Ефремов¹, В. И. Мищенко², И. В. Мищенко³

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
^{1,2,3} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для обоснования величины интервала между поверками и расчета показателей эффективности функционирования при использовании по назначению средств измерений (СИ) используются различные модели функционирования в ходе использования по назначению. На основе предложенной полумарковской модели процесса функционирования средств измерений военного назначения обосновано определение периодичности их поверки. Показана актуальность применения теории полумарковских процессов для моделирования функционирования СИ. *Материалы и методы.* Разработана полумарковская модель процесса функционирования СИ, позволяющая комплексно учесть влияние на надежность средств измерений следующих факторов: периодичности поверки СИ, интенсивности использования по назначению, вероятности возникновения неисправности рабочего эталона, вероятности неисправности СИ, вероятности отказа ЗИП, продолжительности проведения поверки, продолжительности диагностирования СИ, продолжительности замены неисправных элементов, вероятностей возникновения ошибок I и II рода. Показателем эффективности функционирования СИ выбран коэффициент готовности средств измерений, являющийся аналогом коэффициента метрологической исправности для СИ. *Результаты и выводы.* С помощью данной модели можно рассчитать величину оптимального интервала между поверками СИ.

Ключевые слова: полумарковский процесс, средства измерений, периодичность поверки, процесс функционирования

Для цитирования: 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

SEMI – MARKOV MODEL OF THE FUNCTIONING PROCESS MEASURING INSTRUMENTS

V.A. Efremov¹, V.I. Mishchenko², I.V. Mishchenko³

^{1,2,3} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia
^{1,2,3} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* To substantiate the value of the interval between verifications and to calculate the performance indicators of functioning when measuring instruments (MI) are used for their intended purpose, various models of the functioning of the means during intended use are used. On the basis of the proposed semi-Markov model of the process of functioning of measuring instruments for military purposes, the determination of the frequency of their verification is justified. The relevance of the application of the theory of semi-Markov processes for modeling the functioning of MI is shown. *Materials and methods.* A semi-Markov model of the MI functioning process has been developed, which allows to comprehensively take into account the influence of the following factors on the reliability of measuring instruments: the frequency of MI verification, the intensity of intended use, the probability of a malfunction of the working standard, the probability of a malfunction of the MI, the probability of a failure of the spare parts, the duration of verification, the duration of MI diagnostics, the duration of replacement of faulty elements, the probabilities of errors I and II rhoda. The indicator of the effectiveness of the functioning of the MI is the readiness coefficient of measuring instruments, which is an analogue of the coefficient of metrological serviceability for the MI. *Results and conclusions.* With the help of this model, it is possible to calculate the value of the optimal interval between the verifications of MI.

Keywords: semi-Markov process, measuring instruments, verification periodicity, functioning process

For citation: Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V. Semi-Markov model of the functioning process measuring instruments. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):29–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-3

Интервалы между поверками (ИМП) являются одной из важных характеристик СИ, поскольку они определяют не только их технические характеристики, но и существенно влияют на боеготовность вооружения. Поэтому требования к ИМП постоянно ужесточаются, что находит свое отражение в технических требованиях на вновь разрабатываемые и модернизируемые СИ. На ранних этапах проектирования для установления ИМП используются расчетные методы, приведенные в РМГ 74-2004. В начале рассчитывается первоначальное значение интервалов между поверками на этапе утверждения типа СИ согласно РМГ 74-2004. В этом документе приведен ряд методик, основанных на использовании показателей метрологической надежности СИ, таких как вероятность того, что в течение заданной наработки метрологический отказ не возникнет или средняя наработка на метрологический отказ, равная математическому ожиданию наработки до первого метрологического отказа. Согласно РМГ 74-2004 аналогом коэффициента метрологической исправности СИ является комплексный показатель надежности СИ – коэффициент готовности, т.е. $K_{ми} \sim K_r$.

Наступление метрологического отказа может быть обнаружено только при поверке СИ, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Является очевидным, что существует оптимальная величина ИМП.

Действительно, частые поверки приводят к отрыву СИ от использования их по назначению, подрывают боеготовность вооружения и военной техники (ВВТ). Последнее обусловлено тем, что СИ, часто находясь на поверке, не могут обеспечить контроль и оценку технического состояния ВВТ. Это приводит к снижению коэффициента готовности и коэффициента метрологической исправности.

Редкие поверки приводят к тому, что в СИ накапливаются метрологические отказы, которые могут быть выявлены только при их поверке. И чем реже поверки, тем этих отказов больше. Накопление метрологических отказов приводит к тому, что после поверки СИ отправляются на ремонт. Это опять же приводит к снижению $K_{ми}$ и K_r . Таким образом, существует оптимальное значение ИМП, обеспечивающее максимум $K_{ми}$ и K_r и адаптацию значений этих показателей к достигнутому уровню безотказности и метрологической исправности СИ.

Перспективным направлением обоснования величины ИМП является использование моделей функционирования СИ в ходе их применения по назначению, позволяющих рассчитать эффективность этих средств как функцию ИМП. При этом уровень сложности модели определяется не только перечнем учитываемых факторов, но и соответствующим уровнем сложности самого СИ, наличием в последнем разнородных подсистем и элементов.

Для простых СИ моделирование процесса функционирования представляет собой чередование временных промежутков, в которых это средство метрологически исправно и используется по назначению либо в случае метрологического отказа, обнаруженного в ходе поверки, восстанавливается. Такой процесс описывается марковской моделью, граф которой включает два состояния: работоспособное и восстановления.

Граф этой модели представлен на рис. 1.

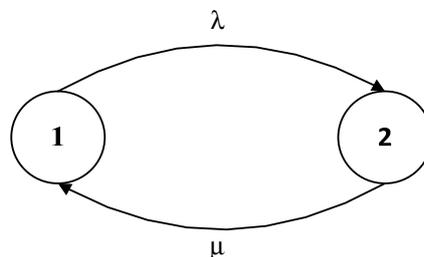


Рис. 1. Граф состояний модели процесса функционирования простых СИ:
 λ и μ – интенсивности отказов и восстановлений простых СИ соответственно

Решения системы уравнений Колмогорова для такой модели в стационарном режиме, представленной графом на рис. 1, на этапе нормальной эксплуатации имеют вид

$$P_1 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \quad P_2 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}.$$

Так как $\lambda = \frac{1}{T_o}$, а $\mu = \frac{1}{T_B}$, то $P_1 = \frac{1}{T_B \left(\frac{1}{T_o} + \frac{1}{T_B} \right)} = \frac{1}{\frac{T_B}{T_o} + 1} = \frac{T_o}{T_o + T_B} = K_r$, где T_o – средняя наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления.

Таким образом, вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии соответствует стандартизованному определению коэффициента готовности. С помощью этого показателя оценивается эффективность использования по назначению простых СИ.

Сложные СИ обладают некоторым уровнем избыточности, позволяющим накапливать соответствующее этому уровню количество отказов элементов, не приводящее к отказу системы в целом. С точки зрения всего средства эти отказы являются неисправностями. Возвращение утраченного уровня избыточности сложного СИ осуществляется в рамках поверки. Процесс функционирования СИ в ходе эксплуатации представляется полумарковской моделью, представленной на рис. 2.

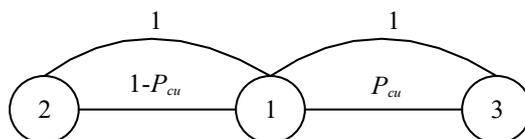


Рис. 2. Граф состояний для модели процесса эксплуатации СИ с избыточностью

Множество состояний графа $R = \{R_i\}, i=1, \dots, r$ (r – количество состояний графа, для графа на рис. 2, очевидно, $r = 3$) включает: R_1 – состояние исправности; R_2 – состояние, когда на исправном СИ проводится поверка; R_3 – состояние, когда на неисправном СИ проводится поверка, отыскивается неисправность и после этого средство восстанавливается.

В соответствии с работой [1] полумарковский процесс задается начальным состоянием и двумя матрицами – матрицей переходов вложенной марковской цепи $W, (W = \{w_{ij}\}, (ij) = 1, \dots, r)$ и матрицей условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях $F(t), F(t) = \{F_{ij}(t)\}, (i, j) = 1, \dots, r$.

Для графа, представленного на рис. 2, эти матрицы имеют вид

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1-P_{ci} & P_{ci} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix}, \quad F(t) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & F_{12}(t) & F_{13}(t) \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} F_{21}(t) & 0 & 0 \\ F_{31}(t) & 0 & 0 \end{matrix} \end{matrix}.$$

В матрице W

$$P_{ci} = 1 - \exp(-\lambda_{ci} T_{имп}),$$

где P_{ci} – вероятность возникновения неисправности СИ; λ_{ci} – интенсивность возникновения метрологических неисправностей; $T_{имп}$ – интервал между поверками.

Неравные нулю элементы матрицы $F(t)$ имеют вид

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 0, & t < T_{имп}; \\ 1, & t \geq T_{имп} \end{cases}; \quad F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \frac{1 - \exp(-\lambda_{ci} t)}{1 - \exp(-\lambda_{ci} T_{имп})}, & 0 < t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases}$$

$$F_{21}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{п}, \\ 1, & t \geq T_{п}; \end{cases} \quad F_{31}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{п} + T_B, \\ 1, & t \geq T_{п} + T_B, \end{cases}$$

где $T_{п}$ – математическое ожидание продолжительности поверки; T_B – математическое ожидание продолжительности восстановления СИ.

Стационарное распределение вероятностей состояний полумарковского процесса в соответствии с работой [1] определяется по формуле

$$\pi_i = \frac{P_i m_i}{\sum_{j=1}^3 P_j m_j}, \quad i, j = \overline{1, r}, \quad (1)$$

где P_i – стационарная вероятность пребывания вложенной марковской цепи в i -м состоянии; m_i – математическое ожидание продолжительности пребывания СИ в i -м состоянии.

Стационарное распределение вероятностей пребывания вложенной марковской цепи в состояниях $P = (P_1, P_2, P_3)$ отыскивается в результате решения системы уравнений, записанной в матричном виде и удовлетворяющее условию нормировки

$$\overline{P} = \overline{PW}, \quad \sum_{j=1}^r P_j = 1, \quad 0 \leq P_j \leq 1, \quad j = \overline{1, r}. \quad (2)$$

Решение этой системы уравнений имеет вид

$$P_1 = \frac{1}{2}; \quad P_2 = \frac{1 - P_{\text{сн}}}{2}; \quad P_3 = \frac{P_{\text{сн}}}{2}.$$

Математические ожидания пребывания в состояниях определяются по традиционной формуле [1]

$$m_i = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt, \quad i = \overline{1, r}, \quad (3)$$

здесь $F_i(t)$ – безусловные функции распределения вероятностей ухода процесса из соответствующих состояний, отыскиваемые в соответствии с [1] по формуле

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^3 F_{ij}(t) w_{ij}, \quad (i, j) = \overline{1, r},$$

где $F_{ij}(t)$ – элементы матрицы $F(t)$; w_{ij} – элементы матрицы W .

Тогда средние времена пребывания полумарковского процесса в состояниях $F_i(t)$ определяются как

$$m_1 = \frac{1}{\lambda_{\text{сн}}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})]; \quad m_2 = T_{\text{п}}; \quad m_3 = T_{\text{п}} + T_{\text{в}}.$$

Таким образом, показателем эффективности функционирования СИ в процессе использования по назначению будет вероятность застать полумарковский процесс и, следовательно, объект исследования в исправном состоянии R_1 в произвольный момент времени, т.е.

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{сн}}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})]}{\frac{1}{\lambda_{\text{сн}}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})] + T_{\text{п}} + [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})] T_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Представленное выражение является аналогом коэффициента технического использования, приведенного в ГОСТ 27.002–2015. Как видно из формулы (4), приведенная модель учитывает безотказность объекта исследования $\lambda_{\text{сн}}$, продолжительность проверки $T_{\text{п}}$, величину межповерочного интервала $T_{\text{имп}}$ и продолжительность восстановления $T_{\text{в}}$. Недостатком модели является отсутствие учета качества проверки, которое определяется достоверностью контроля технического состояния СИ, проводимого в ходе проверки.

Исследованиям процессов использования по назначению сложных технических систем посвящены работы профессоров Ю. К. Беляева, А. Д. Соловьева, Е. Ю. Барзиловича, В. А. Каштанова, А. В. Смагина, Л. И. Волкова, Е. И. Сычева, В. И. Мищенко и др.

Среди них по совокупности учитываемых факторов выделяются именно полумарковские модели, разработанные профессорами В. И. Мищенко, Е. И. Сычева и Л. И. Волкова [2–4].

Как показывает анализ моделей процесса функционирования технических систем [2, 3, 5–7], наиболее адекватной с точки зрения учета влияния достоверности контроля параметров

при поверке СИ является модель, предложенная профессором В. И. Мищенко [2]. Эта модель взята в качестве базовой. Ее суть заключается в том, что контроль пригодности СИ, проводимый в рамках поверки, сводится к измерению, как правило, некоторого постоянного набора независимых параметров. По результатам контроля принимается решение об отнесении состояния объекта к пригодному или непригодному. Обнаружение метрологических неисправностей, обусловивших непригодность, осуществляется только при проведении поверки. Периодичность поверки образца СИ определяется как продолжительность временного промежутка $T_{\text{имп}}$, по истечении которого СИ поверяется в течение случайного времени τ_n , ограниченного сверху временем $T_{\text{п}}$, т.е. $\tau_n \leq T_{\text{п}}$. Своевременная поверка средств измерений обеспечивает требуемый уровень их пригодности к использованию по назначению. Чем выше уровень сложности СИ (соответственно, уровень избыточности), тем критичнее становятся принятые решения о годности СИ к достоверности полученных результатов. При этом большое значение приобретает метрологическая исправность рабочего эталона. Поэтому при разработке модели процесса функционирования СИ при использовании по назначению необходимо учитывать возможность снижения достоверности показаний СИ в случае метрологического отказа рабочего эталона при проведении поверки СИ. Таким образом, при использовании СИ по назначению могут возникнуть следующие ситуации:

1. Перед началом проведения поверки СИ с вероятностью $1 - P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$ пригоден к использованию по назначению, рабочий эталон с вероятностью $1 - P_{\text{Э}}(T_{\text{п}})$ пригоден к использованию по назначению. В результате проведения поверки СИ в течение ограниченного сверху времени $\tau_n \leq T_{\text{п}}$ поверитель может принять следующие решения:

а) СИ пригоден (правильное решение) – с вероятностью $1 - \alpha_1$. После проведения поверки СИ продолжает применяться по назначению до следующей поверки;

б) СИ непригоден (ошибочное решение, соответствующее ложной регистрации метрологической неисправности СИ, т.е. ошибке первого рода) с вероятностью $F_1(t)$. Причем эта ошибка обусловлена в первую очередь ограниченной метрологической надежностью эталона. В этом случае проводится дополнительная поверка, позволяющая выявить достоверно отсутствие метрологического отказа. Проведение дополнительной поверки проводится в течение ограниченного сверху времени $\tau_{\text{дп}} \leq T_{\text{дп}}$.

2. До проведения поверки СИ с вероятностью $1 - P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$ пригоден к использованию по назначению, рабочий эталон с вероятностью $P_{\text{Э}}(T_{\text{п}})$ отказал. В зависимости от исхода поверки, а также характера метрологического отказа рабочего эталона (частичного или полного) по результатам поверки СИ могут быть произведены следующие оценки его состояния:

а) СИ непригоден (ложный метрологический отказ) – с вероятностью F_2 . В этой ситуации проводится дополнительная поверка;

б) СИ пригоден – с вероятностью $1 - \alpha_2$.

3. До начала проведения поверки СИ с вероятностью $P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$ оказался непригодным, рабочий эталон с вероятностью $1 - P_{\text{Э}}(T_{\text{п}})$ пригоден к использованию по назначению. В результате проведения поверки о состоянии СИ могут быть приняты следующие решения:

а) СИ непригоден (правильное решение) – с вероятностью $1 - \beta_1$. После обнаружения метрологического отказа СИ проходит дополнительную поверку в течение времени $\tau_{\text{дп}} \leq T_{\text{дп}}$.

Затем, в случае наличия отказавшего элемента в ЗИП, с вероятностью $1 - P_{\text{ЗИП}}$, проводится замена этого элемента на работоспособный за время $t_3 \leq T_3$ (временем поиска в комплекте ЗИП пренебрегается). Если же требуемый элемент, с вероятностью $P_{\text{ЗИП}}$, отсутствует и в комплекте ЗИП, тогда оформляется заявка на предприятие-изготовитель, которая удовлетворяется в течение случайного времени экстренной поставки $t_{\text{эд}} \leq T_{\text{ЭП}}$ и после замены и проведения поверки продолжает использоваться по назначению;

б) СИ пригоден (пропуск отказа) – с вероятностью β_2 . В этом случае СИ продолжает использоваться по назначению с метрологическим отказом, снижающим эффективность функционирования СИ при использовании по назначению, до следующей поверки.

$$\alpha = \alpha_1(1 - P_3) + \alpha_2 P_3; \quad \beta = F_1(1 - P_3) + \beta_2 P_3,$$

где α, β – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода; P_3 – вероятность возникновения метрологического отказа рабочего эталона.

Для нормального этапа процесса функционирования СИ интенсивности отказов элементов считаются константами и тогда вероятность возникновения метрологического отказа СИ в течение периода между поверками $P_{СИ}$ определится по традиционной формуле

$$P_{СИ} = P_{СИ}(T_{имп}) = 1 - \exp(-\lambda_{СИ} T_{имп}), \quad (5)$$

где $P_{СИ}(T_{имп})$ – вероятность возникновения неисправности, обусловившей непригодность СИ, на интервале $[0, T_{имп}]$; $\lambda_{СИ}$ – интенсивность метрологических отказов СИ.

В матрице W указана также вероятность $P_{зип}$, которая соответствует вероятности отказа ЗИП, т.е. вероятности того, что после обнаружения отказа и обращении к ЗИП требуемый элемент в ЗИП будет отсутствовать. Эта вероятность рассчитывается по традиционным методикам, приведенным в ГОСТ РВ 27.3.03–2005.

Ненулевые элементы матрицы $F(t)$ определяются с учетом особенностей обеспечения адекватности математического представления реального процесса и представлены ниже

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{1 - e^{-\lambda_{СИ} t}}{1 - e^{-\lambda_{СИ} T_{имп}}}, & 0 < t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases}$$

$$F_{13}(t) = F_{64}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases} \quad F_{24}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{e^{-\lambda_{СИ} T_{имп}} (e^{\lambda_{СИ} t} - 1)}{1 - e^{-\lambda_{СИ} T_{имп}}}, & 0 < t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases}$$

$$F_{31}(t) = F_{35}(t) = F_{46}(t) = F_{47}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{II}, \\ 1, & t \geq T_{II}; \end{cases} \quad F_{51}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ДII}, \\ 1, & t \geq T_{ДII}; \end{cases}$$

$$F_{78}(t) = F_{79}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{Д}, \\ 1, & t \geq T_{Д}; \end{cases} \quad F_{89}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ЭД}, \\ 1, & t \geq T_{ЭД}; \end{cases} \quad F_{91}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{3AM} + T_{II}, \\ 1, & t \geq T_{3AM} + T_{II}. \end{cases}$$

В представленных формулах обозначены: $T_{имп}$ – периодичность поверки СИ; T_{II} – продолжительность проведения поверки СИ; $T_{ДII}$ – продолжительность повторной проверки в случае ошибки 1-го рода; $T_{Д}$ – продолжительность диагностирования СИ; $T_{ЭД}$ – экстренная доставка исправного элемента; T_{3AM} – продолжительность замены неисправных элементов.

В соответствии с формулами (1)–(3) были получены соответствующие параметры полумарковского процесса:

– стационарные вероятности вложенной марковской цепи – набор (P_1, P_2, \dots, P_9) :

$$P_1 = \frac{1}{2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип})}; \quad P_2 = \frac{P_{СИ}}{2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип})};$$

$$P_3 = \frac{1 - P_{СИ}}{2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип})}; \quad P_4 = \frac{P_{СИ}}{D \left[2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип}) \right]};$$

$$P_5 = \frac{F(1-P_{\text{си}})}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})}; P_6 = \frac{P_{\text{си}}(1-D)}{D\left[2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})\right]};$$

$$P_7 = \frac{P_{\text{си}}}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})}; P_8 = \frac{P_{\text{си}}P_{\text{зип}}}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})};$$

$$P_9 = \frac{P_{\text{си}}}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})};$$

– математические ожидания продолжительности пребывания в состояниях $F_i(t)$ – набор (m_1, m_2, \dots, m_9) :

$$m_1 = \frac{1}{\lambda_{\text{си}}}P_{\text{си}}; m_2 = \frac{1}{P_{\text{си}}}(T_{\text{имп}} - m_1); m_3 = m_4 = T_{\text{п}};$$

$$m_5 = T_{\text{дп}}; m_6 = T_{\text{имп}}; m_7 = T_{\text{д}}; m_8 = T_{\text{эд}}; m_9 = T_{\text{зам}}.$$

Распределение вероятностей состояний полумарковского процесса – набор $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_9)$:

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{си}}}P_{\text{си}}}{(T_{\text{имп}} + T_{\text{п}})\left(1 - P_{\text{си}} + \frac{P_{\text{си}}}{D}\right) + T_{\text{дп}}F(1 - P_{\text{си}}) + P_{\text{си}}(T_{\text{д}} + T_{\text{зам}} + T_{\text{п}} + P_{\text{зип}}T_{\text{эд}})} = \frac{P_{\text{си}}}{\lambda_{\text{си}}Q};$$

$$\pi_2 = \frac{\lambda_{\text{си}}T_{\text{имп}} - P_{\text{си}}}{\lambda_{\text{си}}Q}; \pi_3 = \frac{T_{\text{п}}(1 - P_{\text{си}})}{Q}; \pi_4 = \frac{P_{\text{си}}T_{\text{п}}}{DQ}; \pi_5 = \frac{T_{\text{дп}}F(1 - P_{\text{си}})}{Q};$$

$$\pi_6 = \frac{P_{\text{си}}(1 - D)T_{\text{имп}}}{DQ}; \pi_7 = \frac{P_{\text{си}}T_{\text{д}}}{Q}; \pi_8 = \frac{P_{\text{си}}P_{\text{зип}}T_{\text{эд}}}{Q}; \pi_9 = \frac{P_{\text{си}}(T_{\text{зам}}T_{\text{п}})}{Q}.$$

Здесь π_1 соответствует вероятности застать объект поверки, т.е. СИ в состоянии пригодности в произвольный момент времени, т.е. коэффициенту готовности. Но теперь этот коэффициент явно зависит от интенсивности метрологических отказов, обусловивших непригодность, величины межповерочного интервала, продолжительности поверки, ошибок первого и второго родов и продолжительностей диагностирования, замены и экстренной доставки.

Заключение

Представленная в данной статье полумарковская модель процесса функционирования СИ позволяет комплексно учесть влияние на надежность средств измерений различных факторов: периодичности поверки СИ, интенсивности использования по назначению, вероятности возникновения неисправности рабочего эталона, вероятности неисправности СИ, вероятности отказа ЗИП, продолжительности проведения поверки, продолжительности диагностирования СИ, продолжительности замены неисправных элементов, вероятностей возникновения ошибок I и II рода. С помощью данной модели можно рассчитать величину оптимального интервала между поверками СИ.

Список литературы

1. Харламов Б. П. Непрерывные полумарковские процессы. СПб. : Наука, 2001. 431 с.
2. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
3. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.

4. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.
5. Новиков А. Н., Кравцов А. Н., Ширямов О. А. Математическая модель прогнозирования изменения значения критической составляющей погрешности рабочего эталона единицы величины с учетом априорной информации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2018. Вып. 664. С. 102–109.
6. Новиков А. Н. Алгоритм индивидуального прогнозирования предельных экономически целесообразных сроков эксплуатации измерительных комплексов // Вестник СибГУТИ. 2016. № 4. С. 19–24.
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. Kharlamov B.P. *Neprevyuvnye polumarkovskie protsessy = Continuous semi-Markov processes*. Saint Petersburg: Nauka, 2001:431. (In Russ.)
2. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problems of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politehnika-servis, 2016:218. (In Russ.)
3. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
4. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
5. Novikov A.N., Kravtsov A.N., Shiryamov O.A. Mathematical model of forecasting changes in the value of the critical component of the error of the working standard of the unit of magnitude taking into account a priori information. *Trudy Voенно-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*. 2018;(664):102–109. (In Russ.)
6. Novikov A.N. Algorithm of individual forecasting of marginal economically expedient-different service life of measuring complexes. *Vestnik SibGUTI = Bulletin of SibSUTI*. 2016;(4):19–24. (In Russ.)
7. Mishchenko V.I., Kravtsov A.N., Mamleev T.F. Semi-Markov model of 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

Валерий Александрович Ефремов

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

Valeriy A. Efremov

Adjunct,
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)

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)

Илья Владимирович Мищенко

кандидат технических наук,
старший преподаватель –
начальник метрологической службы,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Ilya V. Mishchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer – head of the metrological service,
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 05.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 06.06.2022

Принята к публикации/Accepted 11.07.2021