

ВЫБОР ПРОТОТИПА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЕЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ

С. С. Верхушин¹, В. И. Мищенко², И. В. Мищенко³, К. Н. Исаков⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3,4} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проведен анализ работ, посвященных моделированию процесса функционирования измерительного канала измерительной системы наземного технологического оборудования. Проведено обоснование, что одним из перспективных направлений моделирования процессов функционирования измерительных систем наземного технологического оборудования испытательных космодромов является использование теории марковских и полумарковских процессов. *Материалы и методы.* Рассмотрены известные полумарковские модели, которые позволяют обосновать периодичность контроля технического состояния измерительной системы наземного технологического оборудования. Определено, что все полумарковские модели опираются на известный закон распределения, вместе с тем на этапе проектирования такое предположение неуместно. *Результаты и выводы.* Предложена модель процесса функционирования измерительного канала многоканальной измерительной системы при ограниченной информации о ее надежности.

Ключевые слова: измерительная система, безотказность, интервал между поверками, аппаратура контроля, контроль технического состояния, полумарковский процесс

Для цитирования: Верхушин С. С., Мищенко В. И., Мищенко И. В., Исаков К. Н. Выбор прототипа модели процесса функционирования измерительного канала многоканальной измерительной системы для расчета ее коэффициента готовности при ограниченной информации о надежности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 30–39. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-4

SELECTION OF A PROTOTYPE MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF THE MEASURING CHANNEL OF A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM FOR CALCULATING ITS AVAILABILITY COEFFICIENT WITH LIMITED INFORMATION ABOUT RELIABILITY

S.S. Verkhushin¹, V.I. Mishchenko², I.V. Mishchenko³, K.N. Isakov⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

^{1,2,3,4} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The article analyzes the works devoted to modeling the process of functioning of the measuring channel of the measuring system of ground-based technological equipment. The substantiation is carried out that one of the promising directions of modeling the processes of functioning of measuring systems of ground-based technological equipment of test cosmodromes is the use of the theory of Markov and semi-Markov processes. *Materials and methods.* The well-known semi-Markov models are considered, which make it possible to justify the frequency of monitoring the technical condition of the measuring system of ground-based technological equipment. It is determined that all semi-Markov models are based on the well-known distribution law, however, at the design stage such an assumption is inappropriate. *Results and conclusions.* A model of the process of functioning of the measuring channel of a multichannel measuring system with limited information about its reliability is proposed.

Keywords: measuring system, reliability, interval between checks, control equipment, technical condition control, semi-Markov process

For citation: Verkhushin S.S., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V., Isakov K.N. Selection of a prototype model of the process of functioning of the measuring channel of a multichannel measuring system for calculating its availability coefficient with limited information about reliability. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):30–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-4

Введение

Анализ современных тенденций и перспектив развития геополитической обстановки свидетельствует о том, что использование космического пространства и возможностей космических систем во всем мире оценивается как один из важнейших факторов политической, военной и экономической безопасности государства.

Для подготовки ракет космического назначения (РКН) и космических аппаратов (КА) используется наземное технологическое оборудование технического и стартового комплексов испытательных космодромов.

В качестве основного наземного технологического оборудования космодромов используются измерительные системы (ИС). Они применяются для комплектования систем управления, используемых для подготовки и пуска РКН различных классов, и предназначены для измерения и преобразования значений сигналов, поступающих от первичных измерительных преобразователей, регистрации и отображения результатов измерений. В состав ИС наземного технологического оборудования входят измерительные каналы измерений величин, преобразователи измерительные, модули, контроллеры, источники питания и средства отображения информации. В свою очередь измерительные каналы (ИК) применяются для измерения различных физических величин (напряжение, сила тока, сопротивление и т.д.) и являются отдельным типом средства измерения.

Постоянное расширение задач, наращивание орбитальной группировки (ОГ), испытание новых типов КА, а также усложнение порядка функционирования РКН приводит к усложнению специального аппаратного и программного обеспечения, наземных средств, объектов управления и технологического оборудования. Также решение задач, стоящих перед испытательными космодромами и пунктами управления КА, в настоящее время во многом определяется разработкой, внедрением новых и совершенствованием существующих ИС.

Традиционно показатели надежности проектируемых и вновь создаваемых ИС при отсутствующей статистической информации о надежности представляют собой усредненные значения по основным узлам (системам, элементам), которые в дальнейшем не оказывают эффективного влияния на процесс функционирования ИС.

В свою очередь имеющаяся система технического обслуживания и метрологическое обслуживание ИС, предусматривающие проведение планово-предупредительного обслуживания (ремонта), а также определение метрологических характеристик не в полной мере позволяют спрогнозировать и своевременно обнаружить возникающие неисправности и отказы. Следовательно, актуальной и в теоретическом, и в прикладном плане является задача обоснования сроков проведения вышеуказанных работ при ограниченной информации о надежности ИС. При этом определение сроков проведения как восстановительных, так и профилактических работ, как показывают результаты исследования, существенно зависит от выбранной или разработанной модели процесса функционирования ИС.

Таким образом, для решения поставленных задач необходимо провести выбор прототипа или разработать модель процесса функционирования ИК ИС наземного технологического оборудования, в комплексе учитывающую основные характеристики процесса их эксплуатации.

Моделирование процессов функционирования ИК ИС наземного технологического оборудования позволит обосновать стратегию метрологического обслуживания при ограниченной информации о надежности и обеспечить требуемые значения.

Под ограниченной информацией о надежности понимается отсутствие информации о законе распределения вероятностей наработки на отказ, а имеющаяся статистическая информация достаточна для определения оценок одного или двух моментов.

*Анализ и обоснование моделей функционирования,
и оценка результативности метрологического обслуживания ИС*

Использование моделей процесса функционирования ИК ИС является одним из перспективных направлений обоснования стратегии метрологического обслуживания ИС.

Для обоснования периодичности метрологического обслуживания ИК ИС необходимо определить интервал между поверками (ИМП) и оценку результативности функционирования ИС. Традиционно для этого используются комплексные показатели надежности на основании статистических (аналогичных) данных (систем) и параметров функционирования подсистем ИС относительно допусковой области этих параметров при испытаниях, а также требований технической документации и принятие на этой основе решения о правильности или неправильности функционирования ИС.

В соответствии с системой метрологического обслуживания обнаружение метрологических отказов происходит во время проведения поверок, в процессе которых проводятся измерения значений характеристик по каждому измерительному каналу (ИК).

Чем сложнее и многофункциональнее ИС благодаря добавлению различных ИК, тем более сложной является ее поверка и тем большее значение приобретает достоверность этой поверки и особенно такая составляющая, как вероятность ошибки второго рода. Поэтому при разработке модели функционирования ИС в процессе эксплуатации необходимо учитывать возможность снижения достоверности поверки ИС.

Современные ИС обладают некоторым уровнем избыточности, позволяющим накапливать соответствующее этому уровню количество отказов ИК, не приводящие к отказу ИС в целом. Возвращение утраченного уровня избыточности ИС осуществляется в рамках поверки. Процесс эксплуатации современных ИС, имеющих избыточность, представляется полумарковской моделью, граф которой изображен на рис. 1.

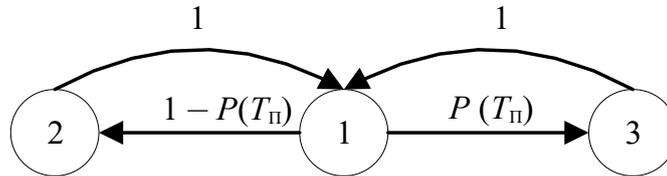


Рис. 1. Граф состояний процесса эксплуатации ИК ИС

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

Вероятность возникновения отказа ИК ИС между поверками будет рассчитываться по формуле

$$P(t \leq T_{\Pi}) = F(T_{\Pi}), \quad (1)$$

где $F(T_{\Pi})$ – функция распределения безотказной работы ИК ИС; T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС.

В соответствии с работами [1, 2] полумарковский процесс задается начальным состоянием и двумя матрицами – матрицей переходов вложенной марковской цепи $W, (W = \{w_{ij}\}, (i, j) = \overline{1, r})$ и матрицей условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях $F(t), F(t) = \{F_{ij}(t)\}, (i, j) = \overline{1, r}$.

Для графа, представленного на рис. 1, эти матрицы имеют вид

$$\mathbf{W} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1-F(T_{\Pi}) & F_{\Pi} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \end{matrix} \quad \mathbf{F}(t) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & F_{12}(t) & F_{13}(t) \end{matrix} \\ \begin{matrix} F_{21}(t) \\ F_{31}(t) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \end{matrix}$$

Неравные нулю элементы матрицы $\mathbf{F}(t)$ имеют вид

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\Pi}; \\ 1, & t \geq T_{\Pi}; \end{cases} \quad F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ \frac{F(t)}{F(T_{\Pi})}, & 0 < t < T_{\Pi}; \\ 1, & t \geq T_{\Pi}; \end{cases}$$

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

где T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_{B} – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК ИС; $F(t)$ – функция распределения наработки на отказ ИК ИС.

Стационарное распределение вероятностей состояний полумарковского процесса в соответствии с работой [2] определяется по формуле

$$\pi_i = \frac{P_i m_i}{\sum_{j=1}^3 P_j m_j}, \quad (i, j) = \overline{1, r}, \quad (2)$$

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

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

$$\begin{cases} P_1 w_{11} + P_2 w_{21} + P_3 w_{31} = P_1; \\ P_1 w_{12} + P_2 w_{22} + P_3 w_{32} = P_2; \\ P_1 w_{13} + P_2 w_{23} + P_3 w_{33} = P_3; \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Решение этой системы уравнений имеет вид

$$P_1 = \frac{1}{2}; P_2 = \frac{1-F(T_{\Pi})}{2}; P_3 = \frac{F(T_{\Pi})}{2}.$$

Указанные выше математические ожидания пребывания в состояниях определяются по традиционной формуле [2]

$$m_i = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt, \quad i = \overline{1, r}. \quad (4)$$

Здесь $F_i(t)$ – безусловные функции распределения вероятностей ухода процесса из соответствующих состояний, отыскиваемые в соответствии с работой [2] по формуле

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

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

$$F_1(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ F(t) & 0 < t < T_{\Pi}, \\ 1, & t \geq T_{\Pi} \end{cases}, \quad F_2(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{III}} \\ 1, & t \geq T_{\text{III}} \end{cases}, \quad F_3(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{III}} + T_{\text{B}} \\ 1, & t \geq T_{\text{III}} + T_{\text{B}} \end{cases}. \quad (5)$$

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

$$m_1 = \int_0^{\infty} [1 - F_1(t)] dt = \int_0^{T_{\Pi}} [1 - F(t)] dt = T_{\Pi} - \int_0^{T_{\Pi}} F(t) dt; \quad m_2 = T_{\text{III}}; \quad m_3 = T_{\text{III}} + T_{\text{B}}, \quad (6)$$

где T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_{B} – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК ИС.

Таким образом, показателем π_1 результативности функционирования ИК ИС в процессе эксплуатации будет вероятность застать полумарковский процесс и, следовательно, объект исследования в исправном состоянии R_1 в произвольный момент времени, т.е.

$$\pi_1 = \frac{T_{\Pi} - \int_0^{T_{\Pi}} F(t) dt}{T_{\Pi} + T_{\text{III}} - \int_0^{T_{\Pi}} F(t) dt + F(T_{\Pi})T_{\text{B}}}. \quad (7)$$

Представленное выражение является аналогом коэффициента готовности, приведенного в ГОСТ Р 27.102–2021. Как видно из формулы (7), приведенная модель учитывает величину интервала между поверками T_{Π} , математическое ожидание продолжительности поверки T_{III} и продолжительность восстановления T_{B} . Недостатком модели является отсутствие учета достоверности проводимой поверки ИК ИС.

Исследованиям процессов эксплуатации сложных технических систем (СТС) посвящены работы профессоров Ю. К. Беляева, А. Д. Соловьева, Е. Ю. Барзиловича, В. А. Каштанова, Б. П. Харламова, Л. И. Волкова, Е. И. Сычева, В. И. Мищенко [3–7].

Среди них по совокупности учитываемых факторов выделяются именно полумарковские модели профессоров Л. И. Волкова, Е. И. Сычева и В. И. Мищенко [3–5].

В работе [3] профессора Л. И. Волкова была разработана полумарковская модель процесса эксплуатации сложных технических систем. Применительно к ИК ИС граф состояний модели функционирования ИК ИС включает пять состояний: R_1 – работоспособное состояние ИК ИС; R_2 – периодические проверки работоспособного состояния ИК ИС; R_3 – ИК ИС восстанавливается после возникновения отказов и ложных отказов, а также после скрытого отказа; R_4 – ИК ИС неработоспособен (скрытый отказ); R_5 – периодические проверки ИК ИС со скрытым отказом.

Граф состояний процесса эксплуатации представлен на рис. 2.

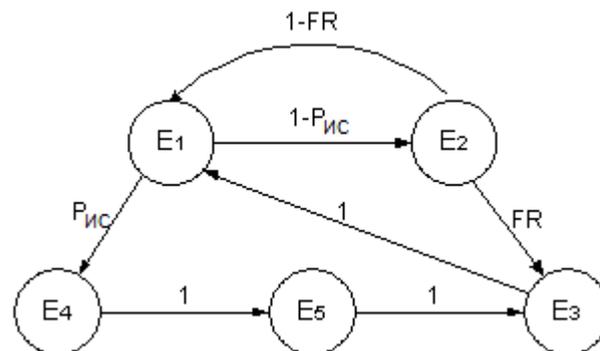


Рис. 2. Граф состояний процесса эксплуатации модели ИК ИС профессора Л. И. Волкова

На рис. 2 обозначены $P_{\text{ИС}}$ – вероятность возникновения отказа ИК ИС; F – вероятность ложной регистрации отказа ИК ИС; R – вероятность возникновения отказа в ходе проверки.

В соответствии с выражениями (2)–(7) полумарковская финальная вероятность нахождения ИК ИС в работоспособном состоянии будет иметь следующий вид:

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\omega_4}(1 - e^{-\omega_4 T_{\Pi}})}{T_{\Pi} + T_{\text{III}} + \frac{2}{\omega_1} - e^{-\omega_4 T_{\Pi}} \left[\frac{2(e^{-(\omega_2 + \omega_3)} + T_{\text{III}} - (1 - e^{-(\omega_2 + \omega_3) T_{\text{III}}})}{\omega_1} \right]}{\omega_2 + \omega_3}}$$

где ω_1 – параметр потока восстановлений; ω_2 – параметр потока отказов; ω_3 – параметр потока ложных отказов; ω_4 – параметр потока скрытых отказов; T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС.

В работе профессора Е. И. Сычева [4] представлена полумарковская модель процесса эксплуатации ИК ИС, граф которой включает шесть состояний: R_1 – работоспособное состояние ИК ИС; R_2 – отказ ИК ИС; R_3 – проверка отказавшего ИК ИС; R_4 – ИК ИС восстанавливается; R_5 – проверка работоспособного состояния ИК ИС; R_6 – необнаруженный отказ ИК ИС.

Граф изменения состояний ИК ИС в ходе эксплуатации представлен на рис. 3, где D – условная вероятность обнаружения отказа в ИК ИС, когда тот действительно отказал; F – условная вероятность ложного обнаружения отказа ИК ИС, когда тот исправен.

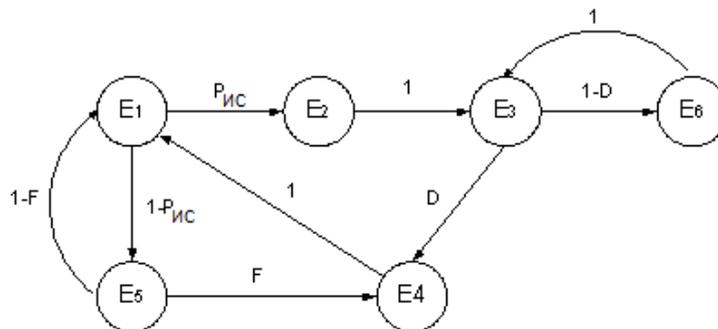


Рис. 3. Граф состояний процесса эксплуатации модели ИК ИС профессора Е. И. Сычева

В соответствии с выражениями (2)–(7) финальная вероятность заставить объект в исправном состоянии примет вид

$$\pi_1 = \frac{1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})}{\left[\frac{\lambda T_{\Pi}}{D} + \exp(-\lambda T_{\Pi}) \right] [1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})] + \lambda T_{\text{III}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})}{\left[\frac{1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})}{D} (1 - D) + 1 \right] [1 - \exp(-\lambda T_{\Pi}) (1 - F)] \lambda T_{\text{B}}}$$

где D – вероятность обнаружения отказа; F – вероятность ложной регистрации отказа; λ – интенсивность отказов; T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_{B} – периодичность восстановления.

Применение модели профессора Л. И. Волкова имеет ряд ограничений, связанных с использованием понятия «скрытый отказ» и, соответственно, параметра скрытых отказов. Если отказ скрытый, то он не может быть обнаружен, и данный факт приводит к невозможности сбора и анализа статистики по таким отказам, которая необходима для расчета параметра скрытых отказов.

Для модели профессора Е. И. Сычева существует ограничение, обусловленное предположением об идентичности восстановления системы после ложной регистрации отказа и действительного обнаружения отказа.

В полумарковской модели процесса функционирования сложной технической системы профессора В. И. Мищенко [5] вышеуказанные ограничения отсутствуют. В этой модели насчитывается семь состояний $R = \{1, 2, \dots, r\}$, ($r = 7$).

Рассматривая данную модель процесса функционирования применительно для ИК ИС получается: R_1 – ИК ИС пригоден и используется по назначению (исходное состояние полумарковского процесса); R_2 – ИК ИС непригоден и функционирует с неисправностью, обусловившей непригодность, до начала контроля технического состояния; R_3 – ИК ИС проверяется при условии, что он к началу проведения контроля технического состояния был исправен; R_4 – ИК ИС проверяется при условии, что он к началу контроля технического состояния был неисправен; R_5 – ИК ИС проходит дополнительную проверку при условии ложной регистрации неисправности; R_6 – ИК ИС используется по назначению с неисправностью до очередного контроля технического состояния; R_7 – ИК ИС проходит дополнительную проверку, подтверждающую ее неисправность, и восстанавливается.

Описанный процесс функционирования формализуется полумарковской моделью, граф которой изображен на рис. 4.

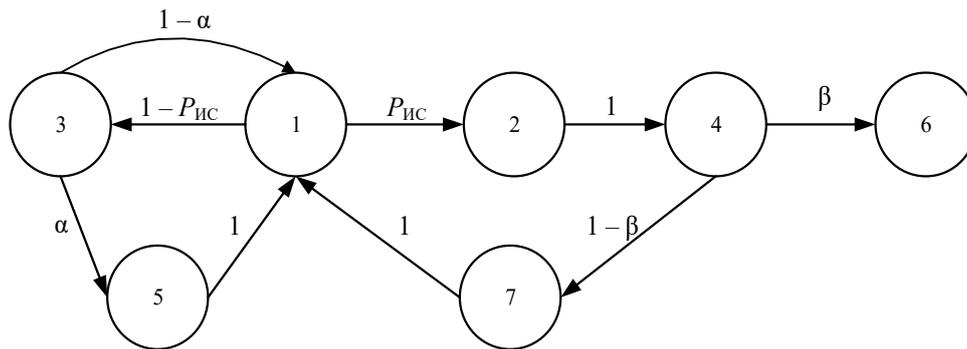


Рис. 4. Размеченный граф полумарковской модели ИК ИС профессора В. И. Мищенко

Матрица переходных вероятностей вложенной марковской цепи \mathbf{W} имеет вид

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 & P_{ис} & 1-P_{ис} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 1-\beta \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с выражениями (2)–(7) финальная вероятность застать объект в исправном состоянии примет вид

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_{ис}}(1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п}))}{(T_{п} + T_{пп})\left(1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п}) + \frac{1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п})}{1 - \beta}\right) + \alpha T_{дп} \exp(-\lambda_{ис}T_{п}) + (1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п}))T_{в}} = K_{г},$$

λ – интенсивность отказов; $T_{п}$ – интервал между поверками ИК ИС; $T_{пп}$ – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; $T_{в}$ – периодичность восстановления.

В соответствии с данной моделью π_1 является аналогом коэффициента готовности. И этот коэффициент явно зависит от интенсивности метрологических отказов, интервала между поверками, продолжительности поверки, ошибок первого и второго родов, продолжительности диагностирования, а также продолжительности восстановления.

В приведенных моделях профессоров Е. И. Сычева и В. И. Мищенко финальная вероятность застать объект в исправном состоянии (коэффициент готовности) рассчитана с учетом полной информации о надежности исследуемого объекта и по известному закону распределения – экспоненциальному. Следовательно, необходимо провести доработку данных моделей с учетом ограниченной информации о надежности.

С учетом функции распределения безотказной работы ИК ИС в полумарковской модели процесса функционирования ИК ИС профессора В. И. Мищенко вероятность заставить ИК ИС в исправном состоянии имеет вид

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{\int_0^{T_{II}} tdF(t)}{(T_{II} + T_{III}) \left(1 - F(T_{II}) + \frac{F(T_{II})}{1 - \beta} \right) + (1 - F(T_{II}))T_{дп}\alpha + F(T_{II})T_B} = \\ &= \frac{\int_0^{T_{II}} tdF(t)}{T_{II} + T_{III} - F(T_{II})T_{II} - F(T_{II})T_{III} + \frac{T_{II}}{1 - \beta} F(T_{II}) + \frac{T_{III}}{1 - \beta} F(T_{II}) + T_{дп}\alpha - F(T_{II})T_{дп}\alpha + F(T_{II})T_B} = \\ &= \frac{\int_0^{T_{II}} tdF(t)}{T_{II} + T_{III} + T_{дп}\alpha - F(T_{II}) \left(T_{II} + T_{III} - \frac{T_{II} + T_{III}}{1 - \beta} + T_{дп}\alpha - T_B \right)}. \end{aligned}$$

Так как $\int_0^{T_{II}} tdF(t) = \int_0^{T_{II}} tf(t)dt$ и $F(T_{II}) = \int_0^{T_{II}} f(t)dt$, то в соответствии с выражениями (2)–(7)

финальная вероятность заставить ИК ИС в исправном состоянии соответствует выражению

$$\pi_1 = \frac{\int_0^{T_{II}} tf(t)dt}{T_{II} + T_{III} + \alpha T_{дп} - \int_0^{T_{II}} f(t)dt \left(T_{II} + T_{III} - \frac{T_{II} + T_{III}}{1 - \beta} + T_{дп}\alpha - T_B \right)}, \quad (8)$$

где T_{II} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_B – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК ИС; $T_{дп}$ – продолжительность повторной проверки в случае ошибки 1-го рода; α, β – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода; $f(t)$ – плотность распределения метрологических отказов ИК ИС.

Приведенная модель профессора В. И. Мищенко так же, как и предыдущая, учитывает достоверность контроля. Вместе с тем процесс восстановления ИК ИС представлен более адекватно, а в случае обнаружения ложного отказа проводится дополнительная перепроверка по отказавшему параметру, что позволяет продолжить использование ИК ИС по назначению. Если же отказ подтверждается, то осуществляется восстановление, а затем ИК ИС возвращается в режим нормального функционирования. Но для данной модели, как и для всех предыдущих рассмотренных моделей, существует ограничение, предполагающее наличие полной информации о надежности исследуемого объекта и известной функции распределения безотказной работы.

Таким образом, с учетом имеющихся положительных сторон модели профессора В. И. Мищенко и доработкой ее в плане учета особенностей функционирования ИК ИС при неизвестной функции распределения безотказной работы (8) данная модель является наиболее приемлемой из рассмотренных выше моделей.

Также суть модели, предложенной профессором В. И. Мищенко, заключается в том, что финальная вероятность заставить ИК ИС в исправном состоянии зависит от плотности распределения метрологических отказов ИК ИС. И в свою очередь данная модель может быть использована для обоснования параметров стратегии метрологического обслуживания [6] при ограниченной информации о надежности на этапе проектирования.

Одной из особенностей этапа проектирования является то, что плотность распределения метрологических отказов ИК ИС неизвестна, а получаемая статистическая информация оказывается достаточной для определения оценок моментов распределения отказов (математического ожидания и дисперсии).

Для решения данной задачи при имеющейся информации об оценках моментов необходимо применить аппарат континуального линейного программирования (КЛП), который позволит определить плотность распределения метрологических отказов. Теория и математические методы для решения задач аппаратом КЛП хорошо отработаны и находят широкое применение в работе [7]. При этом аппарат КЛП предусматривает нахождение такой плотности распределения метрологических отказов ИК ИС, которая минимизирует коэффициент готовности. Такой подход обеспечивает обоснование параметров стратегии метрологического обслуживания при гарантированной величине коэффициента готовности.

Проанализировав вышеизложенные модели и их особенности, можно прийти к выводу, что использование модели профессора В. И. Мищенко с учетом аппарата КЛП является одним из перспективных направлений обоснования стратегии метрологического обслуживания ИК ИС при ограниченной информации о надежности.

Заключение

В данной статье представлен анализ моделей эксплуатации сложных технических систем, применение которых позволяет комплексно учесть влияние на надежность различных факторов: периодичности контроля, интенсивности использования по назначению, вероятности возникновения неисправности, продолжительности проведения контроля, вероятности возникновения ошибок I и II рода. Определено, что для описания процесса функционирования ИС как сложной системы наиболее приемлемой является теория полумарковских процессов. При этом наиболее приемлемой из рассмотренных выше моделей является модель профессора В. И. Мищенко, но для использования данной модели необходимо провести расчет плотности распределения метрологических отказов ИК ИС с применением аппарата КЛП на основании оценок математического ожидания и дисперсии распределения метрологических отказов для каждого ИК ИС.

Список литературы

1. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В. Полумарковская модель процесса функционирования средств измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 29–38. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
2. Харламов Б. П. Непрерывные полумарковские процессы. СПб. : Наука, 2001. 431 с.
3. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.
4. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.
5. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
6. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Гончаров А. П., Ткаченко П. А. Методика обоснования стратегии технического обслуживания мобильного метрологического комплекса на базе одномерной многоярусной полумарковской модели // Вестник метролога. 2023. № 2. С. 12–17.
7. Раскин Л. Г., Кириченко И. О. Континуальное линейное программирование. Харьков : Военный институт ВВ МВС, 2005. 176 с.

References

1. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V. The Semimarkov model of the process of functioning of measuring instruments. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):29–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
2. Kharlamov B.P. *Nepreryvnye polumarkovskie protsessy = Continuous semi-markov processes.* Saint Petersburg: Nauka, 2001:431. (In Russ.)
3. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes.* Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
4. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment.* Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
5. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems.* Saint Petersburg: Politekhniko-servis, 2016:218. (In Russ.)
6. 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.)
7. Raskin L.G., Kirichenko I.O. *Kontinual'noe lineynoe programmirovaniye = Continuous linear programming.* Kharkov: Voennyi institut VV MVS, 2005:176. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Сергей Сергеевич Верхушин**

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

Sergey S. Verkhushin

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)

Илья Владимирович Мищенко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
метрологического обеспечения вооружения
военной и специальной техники,
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 of the sub-department of metrological
support of weapons, military and special equipment,
head of the metrological service,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Кирилл Николаевич Исаков

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

Kirill N. Isakov

Cadet,
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 05.08.2024

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024