

УДК 534.6

К вопросу о разработке методических рекомендаций по оценке эффективности применения метрологического самоконтроля в акустических измерительных системах и комплексах

Кувыкин Юрий Александрович^(*)

original.rus@mail.ru

Супрунук Василий Владимирович

vvs32@mail.ru

Максак Алексей Григорьевич

mcsak@ya.ru

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Московская обл., Мытищи, Россия

Аннотация. Приведен общий подход к разработке методических рекомендаций по оценке эффективности применения метрологического самоконтроля в акустических измерительных системах и комплексах. Изложен порядок разработки методических рекомендаций и приведены особенности применения одномерной многоярусной полумарковской модели для оценки эффективности измерительных систем и комплексов.

Ключевые слова: акустические системы и комплексы, методические рекомендации, метрологический самоконтроль, полумарковская модель, эффективность

On the development of methodological recommendations for assessing the effectiveness of metrological self-monitoring in acoustic measuring systems and complexes

Kuvykin Yuriy Aleksandrovich^(*)

original.rus@mail.ru

Suprunyuk Vasily Vladimirovich

vvs32@mail.ru

Maksa Alexey Grigorievic

mcsak@ya.ru

FSBI GNMC of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Moscow region, Mytishchi, Russia

Abstract. This article presents a general approach to developing methodological recommendations for assessing the effectiveness of metrological self-monitoring in acoustic measurement systems and systems. It outlines the procedure for developing these methodological recommendations and describes the specifics of using a one-dimensional multi-tiered semi-Markov model for assessing the effectiveness of measurement systems and systems.

Keywords: acoustic systems and complexes, methodological recommendations, metrological self-control, semi-Markov model, efficiency

Введение. Акустические измерительные системы и комплексы (АИС) широко применяются для измерений характеристик акустических полей как отдельно, так и в составе различных объектов. При этом АИС, используемые в составе объектов, как правило, пространственно распределены, а их первичные измерительные преобразователи установлены в труднодоступных

местах, что усложняет, а в некоторых случаях делает невозможным их демонтаж с места установки без нарушения конструкции. Для повышения метрологической надежности таких АИС в процессе эксплуатации применяются различные методы метрологического самоконтроля (МСК). Количественная оценка эффективности применения МСК в АИС позволит принимать объективные решения по совершенствованию существующих и разработке новых методов и средств МСК.

Проблеме моделирования процессов эксплуатации сложных технических систем, в том числе систем с МСК, посвящено большое количество публикаций [1–9]. Задачей настоящих исследований является определение общего подхода к разработке методических рекомендаций по оценке эффективности применения МСК в АИС. Методические рекомендации должны содержать комплекс четко сформулированных указаний, способствующих внедрению в практику наиболее оптимального способа оценки эффективности применения МСК в АИС. При этом применение методических рекомендаций должно позволить рационализировать процесс эксплуатации АИС с МСК, повысить результативность и экономичность МСК, снизить затраты на эксплуатацию АИС, повысить их метрологическую надежность. Сущность оценки эффективности процесса эксплуатации АИС с МСК заключается в рассмотрении соответствия применения МСК выбранным критериям при правильном функционировании системы передачи единиц величин, обеспечивающих метрологическую прослеживаемость результатов измерений к соответствующим рабочим эталонам. В качестве показателей для оценки эффективности применения МСК предлагается использовать коэффициент готовности как аналог коэффициента метрологической исправности и коэффициент доверия к информации. Для этого следует учитывать: время проведения поверки и МСК компонентов АИС, выделенное время на поверку и МСК; время безотказной работы и частоты возникновения неисправностей; затраты на восстановление АИС. Для разработки методических рекомендаций целесообразно использовать подходы, изложенные в научных трудах [10–14].

Методы и материалы. Основные положения рекомендаций должны базироваться на использовании полумарковских моделей процесса эксплуатации измерительных систем. Для оценки эффективности применения МСК АИС осуществляется в виде одномерной многоярусной полумарковской модели. Полумарковская модель задается начальным состоянием и двумя матрицами — матрицей переходов вложенной марковской цепи и матрицей условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях. Достоинством полумарковских моделей является их аналитический характер, что позволяет прогнозировать поведение АИС на различных временных интервалах и корректировать параметры модели с учетом получаемой информации.

В модели должны учитываться: периодичность поверки, интенсивность использования по назначению, вероятность возникновения неисправности рабочих эталонов, вероятность возникновения неисправности АИС, вероятность отказа ЗИП, продолжительность проведения поверки, продолжитель-

ность диагностирования АИС, продолжительность замены неисправных элементов, вероятность возникновения ошибок 1-го и 2-го рода.

Граф состояний для модели должен включать состояния: когда АИС исправна, когда на исправной АИС проводится поверка, когда на неисправной АИС проводится поверка, отыскиваются неисправности и после этого АИС восстанавливается.

С помощью полумарковской модели процесса эксплуатации должны рассчитываться: величина оптимального интервала между поверками и коэффициент достоверности информации о состоянии АИС и готовности ее к применению по назначению. Полумарковская модель процесса эксплуатации АИС используется для решения: обоснования определения периодичности поверки сложных АИС, расчета эффективности метрологического обеспечения АИС, учета возможности проведения поверок разными способами — модель должна отражать стационарный процесс эксплуатации АИС, в которой установленная на объекте техника может быть поверена отличающимися по процедуре исполнения способами (с демонтажем или без демонтажа, с использованием эталонов или встроенных мер).

С использованием полумарковских моделей, учитывающих особенности процесса эксплуатации АИС, предлагается разработать специальные методики оценки эффективности применения МСК: методику оценки эффективности применения МСК в АИС и методику оценки эффективности применения разных по процедуре исполнения способов поверки АИС.

Рассмотрим особенности по предложенным методикам оценки эффективности. Процедура методики оценка эффективности применения МСК в АИС основана на классическом подходе построения полумарковской модели процесса эксплуатации измерительных систем [1, 2, 10–14].

Процесс эксплуатации измерительных систем, имеющих распределенную структуру первичных измерительных преобразователей, представляется в виде полумарковской модели, имеющей следующие возможные состояния: исправное, неисправное перед переходом в состояние контроля, контроль неисправного комплекса, возможности устранения неисправности, контроля исправного комплекса, необнаруженного отказа, восстановление неисправности, замена неисправного датчика.

Коэффициент готовности такой АИС определяется как отношение математического ожидания времени работы системы в состоянии исправности к математическому ожиданию времени пребывания системы в рабочем и неисправном состоянии.

Предполагается, что продолжительность МСК и продолжительность восстановления в модели являются детерминированными величинами. Возникновение при эксплуатации системы ситуации «ложный отказ» — ошибка первого рода, а «необнаруженный отказ» — ошибка второго рода. Вероятности ложного и необнаруженного отказов первичных измерительных преобразователей АИС зависят от соответствующих вероятностей ложного и необнаруженного отказов отдельных датчиков.

Особенностью предложенной полумарковской модели процесса эксплуатации АИС является введение дополнительных состояний, позволяющих установить влияние периодичности и продолжительности МСК на коэффициент готовности системы к выполнению функций целевого назначения. Время пребывания в этих дополнительных состояниях является детерминированной величиной и выбирается достаточно малой, чтобы минимизировать ее влияние на процесс функционирования АИС в целом. Кроме того, введение дополнительных состояний незначительно влияет на вероятность нахождения системы в исходном состоянии, что позволяет эффективно и адекватно моделировать процессы перехода системы в нерабочее состояние и состояние контроля. Предварительные результаты полумарковского моделирования процесса эксплуатации АИС с МСК показывают, что путем рационального выбора периодичности и продолжительности МСК возможно достичь необходимых значений коэффициента готовности АИС. Для реализации методики рассматривается процедура построения полумарковской модели процесса эксплуатации системы с использованием рекуррентных соотношений, представленных в работах [13, 14].

В работах [13, 14] отмечается, что построение полумарковской модели эксплуатации систем проводится с использованием ориентированного графа, вершины которого соответствуют состояниям системы, а на дугах графа прописываются вероятности переходов и временные задержки в исходящих вершинах графа. Переходы состояний заданы с помощью матрицы вероятностей переходов. Недостатком такой модели является, что она не позволяет оценить уровень доверия к получаемой от системы информации, а также определить динамику изменения этого уровня в процессе эксплуатации при разных режимах работы системы.

Предлагается подход к построению модели эксплуатации системы с использованием рекуррентных соотношений, позволяющих моделировать этапы эксплуатации и наблюдать динамику изменения уровня доверия к получаемой информации. Для этого АИС принимается как совокупность измерительных каналов, контроль состояния которых осуществляется посредством МСК. При этом принимается предположение, что время контроля и восстановления заметно меньше, чем время периодической поверки систем. Тогда возможно заменить циклические переходы в классической модели эксплуатации на переходы в дополнительные аналогичные состояния и представить модель виде последовательности циклов, описывающих разные этапы эксплуатации измерительных каналов АИС.

На основе информации от АИС определяется алгоритм построения оценки количества измерительных каналов: работоспособных, неисправных и находящихся в состоянии необнаруженного отказа. При этом установлено, что уровень доверия к информации о числе работоспособных измерительных каналов системы и уровень доверия к коэффициенту готовности, соответственно, определяются по формулам [14]:

$$P_{\text{раб}}^{\text{дов}} = \frac{N_{\text{раб}}}{N_{\text{раб}} + N_{\text{НО}}} = 1 - \frac{N_{\text{НО}}}{N_{\text{раб}} + N_{\text{НО}}}; \quad K_{\text{т}}^{\text{ФА}} = \frac{N_{\text{раб}} + N_{\text{НО}}}{N} = \frac{N_{\text{раб}}}{N} + \frac{N_{\text{НО}}}{N},$$

где $N_{\text{раб}}$ — количество работоспособных ИК, $N_{\text{НО}}$ — количество ИК с необнаруженным отказом.

По результатам предварительного моделирования по рассмотренной выше процедуре можно сделать вывод, что уровень доверия к информации в процессе эксплуатации заметно отличается от стационарного значения. Увеличение периодичности и времени МСК приведет к снижению уровня доверия к информации о состоянии измерительных каналов в целом. Это вызвано тем, что в модели учитываются ошибки первого и второго рода, то есть часть измерительных каналов может перейти в состояние ложного и необнаруженного отказа. В то же время увеличение времени МСК приводит к повышению уровня доверия к коэффициенту готовности системы. При этом предложенная полумарковская модель позволяет управлять уровнями доверия за счет изменения параметров обслуживания измерительных каналов: периодичности и продолжительности самоконтроля, продолжительности и полноты оперативного восстановления после проведения самоконтроля, периодичности и продолжительности восстановительных работ.

В работе [14] акцентируется внимание на том, что МСК обуславливает снижение вероятности получения недостоверной измерительной информации в период эксплуатации систем при выходе метрологических характеристик первичных измерительных преобразователей за установленные допустимые пределы и поддержание коэффициента готовности к применению на достаточно высоком уровне. В общем понимании МСК рассматривается как один из основных режимов работы. Этот режим может осуществляться путем подключения встроенных дополнительных преобразователей, встроенных мер или путем подачи опорного сигнала, связь которого с измеряемой величиной или ее изменением известна с требуемой точностью. Он должен опираться на дополнительную информацию, получаемую за счет структурной, временной и функциональной избыточностей, имеющихся или сформированных в АИС с МСК. Описание процесса эксплуатации АИС с МСК можно представить в виде двухконтурной полумарковской модели для моделирования процессов МСК и поверки системы. Распределение МСК АИС в процессе ее эксплуатации позволяет решить задачу адаптации периодичности и объема проведения МСК, проводимых в рамках всех видов обслуживания к уровню надежности системы.

Представляемая в работе [14] полумарковская модель процесса эксплуатации измерительной системы с МСК является стационарной моделью, которая позволяет оценить вероятности нахождения АИС в стационарных состояниях, которые установятся в реальных системах с МСК только через некоторое время, равное нескольким интервалам между поверками. Дополнительные состояния в модели используются для одновременного моделирования контура МСК и контура поверок АИС, переходы в которые из основно-

го состояния осуществляются в детерминированные моменты времени. Коэффициенты модели, задающие вероятности переходов в дополнительные состояния, вычисляются на основе предварительных экспертных оценок или статистической обработки данных за предшествующий период эксплуатации систем с МСК. При этом время ожидания в указанных дополнительных состояниях также детерминировано и выбирается достаточно малым, чтобы не оказывать существенного влияния в процесс функционирования системы в целом.

Использование дополнительных состояний незначительно меняет вероятности нахождения в обобщенном состоянии (исходном и всех дополнительных), что позволяет эффективно и адекватно моделировать процессы перехода систем в неработоспособное состояние, состояние поверок и МСК.

Результаты оценки эффективности по указанной методике показали, что можно рациональным подбором времени и периодичности проведения МСК добиться необходимых показателей коэффициента готовности системы с МСК, позволяющих периодичность проведения поверок систем с МСК, то есть интервал между их поверками, совместить с периодичностью проведения регламентных работ объекта, на котором установлена АИС с МСК. Применение МСК позволяет повысить надежность работы АИС в целом.

В методике оценки эффективности применения разных по процедуре исполнения способов поверки АИС полумарковскую модель в процессе эксплуатации в виде графа переходов из возможных состояний целесообразно базировать на положении работы [18], где: работоспособное состояние после поверки первым способом (ПП), работоспособное состояние после поверки вторым способом (ВП), отказ после ПП, отказ после ВП, проверка работоспособности отказавших измерительных каналов (ИК) после ПП, проверка работоспособности отказавших ИК после ВП, восстановление системы, проверка работоспособности исправных ИК после ПП, проверка работоспособности ИК после ВП, необнаруженный отказ ИК после ПП, необнаруженный отказ ИК после ВП, ложный отказ ИК после ПП, ложный отказ ИК после ВП, контрольная поверка ИК после восстановления.

При описании процесса эксплуатации получены расчетные формулы для вычисления коэффициентов готовности и коэффициентов достоверности информации о состоянии системы [14]:

$$K_F = \pi_1 w_1 / \sum_i \pi_i v_i, \quad K_{FF} = (\pi_1 w_1 + \pi_{11} w_{11}) / \sum_i \pi_i v_i, \quad D_1 = \pi_1 w_1 / (\pi_1 w_1 + \pi_{11} w_{11}),$$

$$D_1 = \pi_1 w_1 / (\pi_1 w_1 + \pi_{11} w_{11}), \quad D_2 = \pi_2 w_2 / (\pi_2 w_2 + \pi_{22} w_{22}),$$

где π_i — относительная доля числа шагов, в которых находится АИС в состоянии E_i , w_i — математическое ожидание времени работы АИС в состоянии E_i , v_i — математическое ожидание времени пребывания АИС в состоянии E_i (E_1 — работоспособное состояние после поверки ПП, E_2 — отказ

после ПП, E_{11} — работоспособное состояние после поверки ВП, E_{22} — отказ после ВП), K_r — коэффициент готовности ИК по результатам ПП; $K_{гт}$ — коэффициент готовности ИК по результатам ПП и ВП; D_1 — коэффициент достоверности информации о состоянии работоспособных ИК; D_2 — коэффициент достоверности информации об отказавших ИК.

Отличие результатов моделирования от предыдущих состоит в том, что в предложенной полумарковской модели вводится показатель достоверности информации о состоянии АИС, имеющий важное значение для автономного функционирования объекта, на котором она установлена. Полумарковская модель позволяет одновременно получить оценки по двум показателям: коэффициентам достоверности информации о состоянии ИК и готовности ИК к применению системы по назначению. При этом определяется структура изменения коэффициента готовности от долей ИК, направляемых на разные способы проведения их поверки. Полученные результаты в части совместного моделирования коэффициентов достоверности информации о состоянии ИК и готовности ИК к применению по назначению при разных по исполнению способов поверки ИК АИС являются ключевыми при принятии решения о выборе режима функционирования объекта, на котором установлены АИС.

Обсуждение полученных результатов. Обобщенная схема подхода к разработке методических рекомендаций по оценке эффективности применения МСК в АИС приведена на рисунке.

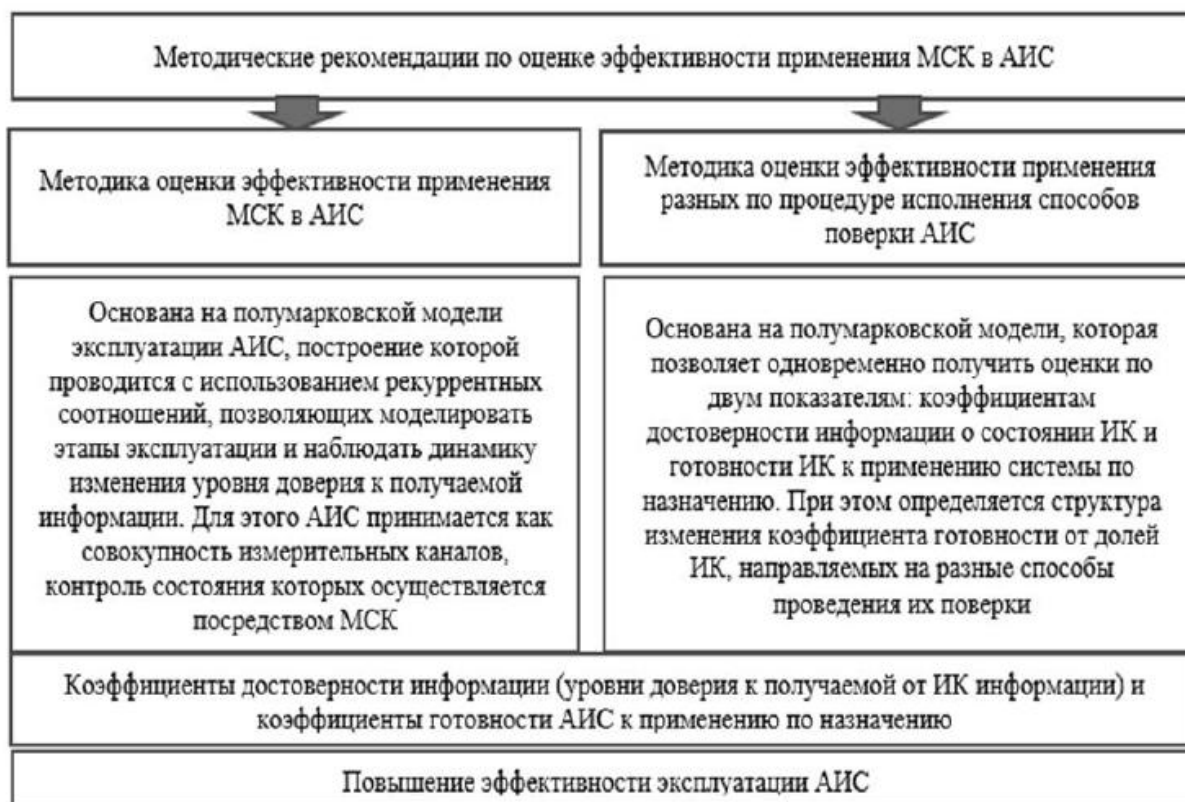


Схема подхода к разработке методических рекомендаций по оценке эффективности применения МСК в АИС

Заключение. Таким образом, в работе приведен общий подход к разработке методических рекомендаций по оценке эффективности применения МСК в АИС с учетом возможности использования разных по процедуре исполнения способов поверки. Представлен порядок разработки методических рекомендаций по оценке эффективности применения МСК в АИС. Показана возможность и целесообразность применения различных подходов в формировании полумарковских моделей процесса эксплуатации АИС с МСК.

С помощью предложенных моделей возможно объективно оценить значения коэффициентов достоверности информации (уровней доверия к получаемой от ИК информации) и готовности АИС к применению по назначению.

Результаты полумарковского моделирования процесса эксплуатации АИС с МСК показывают, что путем рационального выбора периодичности и продолжительности МСК и разных способов поверки ИК возможно достичь необходимых значений коэффициента готовности измерительных систем к применению их по назначению.

Список источников

- [1] Сычев Е.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. *Основы метрологии военной техники*. Москва, Военное издательство, 1993, 399 с.
- [2] Сычев Е.И. *Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры*. Москва, РИЦ «Татьянин день», 1993 (1994), 274 с.
- [3] 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. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-22-27>
- [4] Хайруллин Р.З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники. *Вестник метролога*, 2023, № 1, с. 11–17.
- [5] Ershov D.S., Malakhov A.V., Talalai A.V., Khayrullin R.Z. Analysis of operation models of complex technical systems. *Measuring Techniques*, 2023, vol. 66, pp. 461–474. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02248-z>
- [6] Хайруллин Р.З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники. *Измерительная техника*, 2022, № 8, с. 28–34. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-28-34>
- [7] Deyin Jiang, Tianyu Chen, Juanzhang Xie, Weimin Cui, Bifeng Song. A mechanical system reliability degradation analysis and remaining life estimation method — With the example of an aircraft hatch lock mechanism. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, vol. 230, art. no. 108922. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108922>
- [8] Xiaoli Yan, Guiji Tang, Xialong Wang. Bearing performance degradation assessment based on the continuous-scale mathematical morphological particle and feature fusion. *Measurement*, 2022, vol. 188, art. no. 110571. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110571>
- [9] Merainani B., Laddada S., Bechhoefer E., Chikh M., Benazzouz D. An integrated methodology for estimating the remaining useful life of high-speed wind turbine shaft bearings with limited samples. *Renewable Energy*, 2022, vol. 182, pp. 1141–1151. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.062>

- [10] Смирнов А.П., Хайруллин Р.З., Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В. Модель процесса эксплуатации измерительной системы с встроенным контролем. *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*, 2024, № 691, с. 212–218.
- [11] Ершов Д.С., Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В., Хайруллин Р.З. Особенность оценки эффективности применения тестового контроля в акустических измерительно-информационных комплексах. *Метрологическое обеспечение войск (сил). Сб. тр. ГНМЦ МО РФ*, 2024, вып. 47, т. 1, с. 44–53.
- [12] Супрунук В.В., Кувыкин Ю.А., Щедрин А.Ю., Горбачев А.А. О метрологическом самоконтроле измерительных систем. *Вестник метролога*, 2023, № 4, с. 5–9.
- [13] Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В., Храменков В.Н., Хайруллин Р.З. Оценка эффективности контроля стабильности метрологических характеристик источников измерительной информации в процессе эксплуатации с использованием теории полумарковских моделей. *Вестник метролога*, 2024, вып. 4, с. 8–11.
- [14] Кувыкин Ю.А., Минагуреев Н.А., Супрунук В.В., Хайруллин Р.З. Полумарковская модель процесса эксплуатации измерительной техники с возможностью проведения ее поверок разными способами. *Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение*, 2025, № 4, с. 18–21.