Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

УДК 006.91
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.356-362

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ИСПРАВНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

© М. А. Каменская[1] ✉, П. И. Карелин[2], Т. И. Чернышова[2]

[1] *Кафедра «Электроэнергетика», art_mari@bk.ru;*
[2] *кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация*

Ключевые слова: аналитико-вероятностный метод; информационно-измерительная система; математическая модель; машинное обучение; межповерочный интервал; метрологическая исправность; метрологическая надежность; метрологический ресурс.

Аннотация: Рассмотрена задача определения метрологической исправности и метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем на этапах проектирования и эксплуатации. Предложен общий алгоритм, основанный на аналитико-вероятностном прогнозировании изменения метрологических характеристик с учетом параметров элементной базы и внешних влияющих факторов. На этапе проектирования выполнено построение многофакторной математической модели, позволяющей оценивать метрологический ресурс и прогнозируемый уровень метрологической исправности блока. На этапе эксплуатации осуществлен контроль результатов поверок, определение межповерочных интервалов и сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями. При выявлении расхождений предусмотрена коррекция математической модели с применением аппарата машинного обучения и стохастической подстройки корректирующих коэффициентов.

Введение

В современных условиях интенсивного развития информационно-измерительных систем (**ИИС**) обеспечение заданного уровня метрологической надежности (**МН**) является важной задачей, решение которой обеспечивает точность получаемых измерительных данных и качество принимаемых на их основе технических решений. Как известно, метрологическая надежность ИИС определяется метрологической надежностью аналоговых блоков (**АБ**), составляющих измерительный канал рассматриваемых измерительных средств как при проектировании, так и эксплуатации. Актуальность проблемы определения МН особенно возрастает при эксплуатации АБ ИИС в условиях варьирования внешних влияющих факторов – температуры, давления, влажности и других параметров окружающей среды, которые существенно влияют на изменение во времени метрологических характеристик (**МХ**) исследуемых блоков.

Традиционные подходы к метрологическому обеспечению ИИС, базирующиеся на периодических поверочных работах с фиксированными межповерочны-

ми интервалами, не позволяют оперативно учитывать реальную динамику изменения во времени МХ АБ и качественно прогнозировать метрологический ресурс блока, что приводит к избыточным затратам на чрезмерно частые поверки. Отсутствие единой методологии, объединяющей этапы проектирования и эксплуатации ИИС, затрудняет определение МН на всех этапах жизненного цикла информационно-измерительных систем.

Предложен общий алгоритм, заключающийся в определении показателей МН и уровня прогнозируемой метрологической исправности АБ ИИС на этапе их проектирования, контроле показателей МН на этапе эксплуатации при проведении поверочных работ, а также позволяющий в случае необходимости корректировать показатели МН при эксплуатации блоков в структуре ИИС.

Блок-схема общего алгоритма, позволяющего контролировать метрологическую исправность и МН на этапе проектирования и эксплуатации блоков, представлена на рис. 1.

Методология оценки метрологического уровня блоков информационно-измерительных систем

Рассмотрим основные этапы предлагаемой методологии, объединяющей этапы исследования блоков при их проектировании и эксплуатации. Исходными данными для решения задачи являются параметры элементной базы проектируемого АБ, условия его эксплуатации, структурная и принципиальная схемы блока. Эта априорная информация формирует базу данных (**БД**). В основу определения МН на этапе проектирования положен аналитико-вероятностный метод прогнозирования состояния МХ исследуемых блоков и оценки выбранного показателя МН [1].

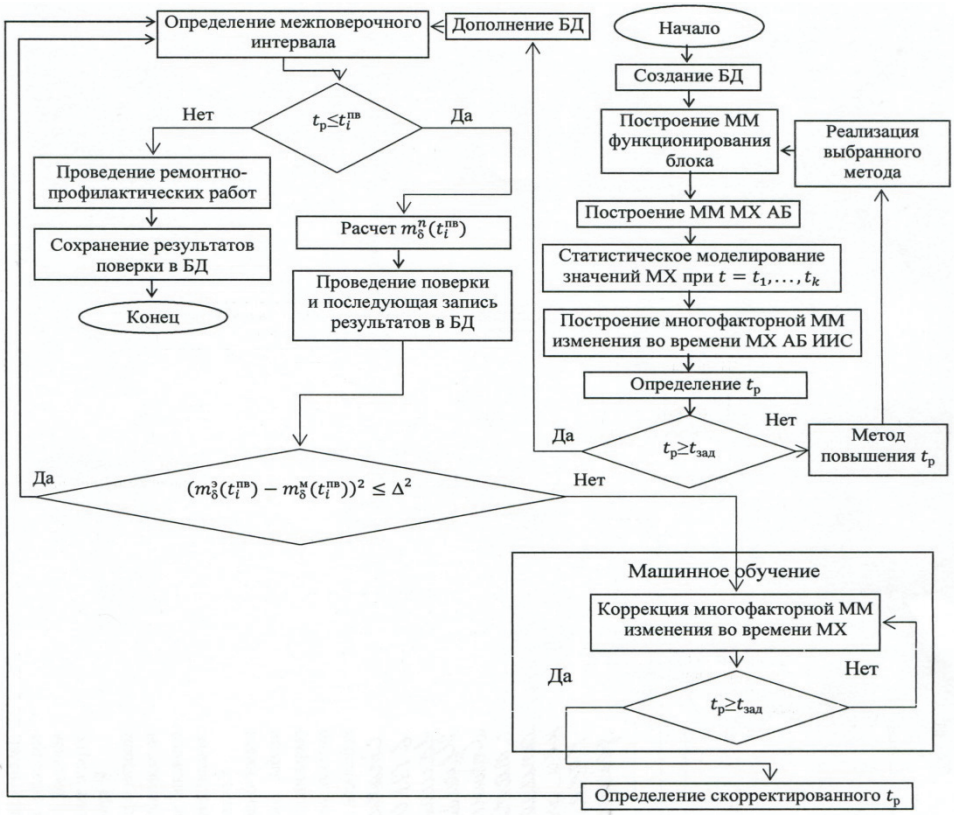

Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения метрологической исправности, объединяющая этапы проектирования и эксплуатации

Метод заключается в последовательном построении математических моделей, позволяющих дать вероятностную оценку требуемого показателя МН и прогнозируемого уровня метрологической исправности АБ. Как правило, в качестве основного показателя метрологической надежности выбирается метрологический ресурс $t_{\text{р}}$.

На начальном этапе строится математическая модель функционирования АБ, общий вид которой определяется как

$$y = F_1\left(x, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), \tag{1}$$

где y, x – выходной и входной сигналы соответственно; $\vec{\xi} = \left\{\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, ..., \vec{\xi}_m\right\}$ – вектор параметров элементной базы блока; $\vec{\varphi} = \left\{\vec{\varphi}_1, \vec{\varphi}_2, ..., \vec{\varphi}_m\right\}$ – вектор внешних влияющих факторов (температуры, давления, влажности и т.д.).

На основе выражения (1) формируется математическая модель МХ

$$S = F_2\left(x, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), \tag{2}$$

где S – исследуемая метрологическая характеристика АБ, позволяющая определить уровень метрологической исправности блока. Как правило, в качестве такой характеристики выступает погрешность блока δ [2].

Согласно (2), изменение во времени исследуемой МХ определяется изменением в процессе эксплуатации параметров элементной базы $\vec{\xi}(t)$ при варьировании внешних факторов $\vec{\varphi} = \text{var}$.

Для расчета значений МХ по модели вида (2) в произвольных точках контроля $t = t_1, ..., t_k$ реализуется процедура статистического моделирования в виде значений математического ожидания $m_S\left(t_i, \vec{\varphi}\right)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_\delta\left(t_i, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), i = 1, ..., k,$ которые являются основой для построения многофакторной математической модели изменения во времени исследуемой МХ:

$$\begin{cases} M_\delta\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right); \\ \psi_{\pm\sigma}\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right) = m_\delta\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right) \pm c\sigma_\delta\left(t, \vec{\xi}, \vec{\varphi}\right), \end{cases} \tag{3}$$

где c – коэффициент, выбираемый с учетом принятого уровня доверительной вероятности.

Построенная модели вида (3) позволяет дать вероятностную оценку величины метрологического ресурса $t_{\text{р}}$, а также формирует дополнения в БД по уровню метрологической надежности блока на прогнозируемый интервал эксплуатации.

На этапе проектирования возможно решение задач, направленных на повышение $t_{\text{р}}$, если рассчитанное значение этого показателя по математической модели не соответствует значениям, указанным в техническом задании на проектирование блока. Реализация выбранного метода (например, метода параметрической оптимизации) позволяет провести коррекцию значения $t_{\text{р}}$ в соответствии с требуемым значением уровня МН для рассматриваемого блока.

На этапе эксплуатации осуществляется последовательное определение межповерочного интервала с учетом выбранного вида математической модели изменение во времени МХ, расчет результатов поверок и сравнение данных, полученных при поверках, и данных, рассчитанных по математической модели вида (3). Полученные экспериментальные данные по контролю метрологической исправности блока при поверках заносятся в БД.

При этом осуществляется текущий контроль значений времени проведения поверок, сопоставление их с величиной метрологического ресурса $t_{\text{р}}$ для исключения возможности функционирования блока при нарушении его метрологической исправности. Если $t_i^{\text{пв}} \geq t_{\text{р}}$, выносится решение о проведении ремонтно-профилактических работ либо по замене блока на метрологически исправный. В случае, когда результаты поверок $m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_i^{\text{пв}}\right)$ и расчетов МХ по модели $m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_i^{\text{пв}}\right)$ (3) отличаются в пределах заданной точности Δ, то есть

$$\left(m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_i^{\text{пв}}\right) - m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_i^{\text{пв}}\right)\right)^2 < \Delta^2, \tag{4}$$

процедура определения времени поверок, их проведение и пополнение БД продолжается с применением действующей математической модели вида (3). Уровень точности Δ устанавливается, исходя из требований по точности к проектируемому блоку и ответственности выполняемых им функций в структуре измерительного канала ИИС. Как правило, значение Δ может быть установлено в пределах 3 – 5 %.

При нарушении условия (4) при анализе результатов поверочных работ, то есть, если

$$\left(m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_n^{\text{пв}}\right) - m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_n^{\text{пв}}\right)\right)^2 \geq \Delta^2, \tag{5}$$

проводится коррекция многофакторной математической модели вида (3) для повышения уровня ее адекватности и последующего использования в процедуре определения межповерочных интервалов на этапе эксплуатации.

Процедура коррекции математической модели осуществляется с помощью аппарата машинного обучения с использованием метода стохастической подстройки многофакторной математической модели вида (3) с последующей верификацией полученных результатов по значениям корректирующих коэффициентов. При этом устанавливается оптимальный уровень корректирующих коэффициентов модели (3) по минимуму рассогласований данных моделей и эксперимента (поверки). Таким образом, окончательный вид скорректированной математической модели вида (3) устанавливается при выполнении неравенства

$$\left(m_{\delta}^{\text{э}}\left(t_n^{\text{пов}}\right) - m_{\delta}^{\text{м}}\left(t_n\right)\right)^2 < \Delta^2. \tag{6}$$

Полученная скорректированная многофакторная математическая модель позволяет получить уточненное или скорректированное значение оценки $t_{\text{р}}^{*}$, величина которого в дальнейшей эксплуатации блока будет использоваться на последующих этапах его работы для контроля уровня метрологической исправности и обеспечения верификации экспериментов, реализуемых с применением исследуемого аналогового блока в структуре ИИС.

Разработанная методология, объединяющая этапы проектирования и эксплуатации, может быть реализована в виде информационно-аналитической системы (**ИАС**). Данная система реализует алгоритмизацию математического аппарата аналитико-вероятностного прогнозирования для обеспечения автоматизированного расчета МХ аналоговых блоков информационно-измерительных систем. Кроме того, ИАС осуществляет контроль метрологической надежности и метрологической исправности блоков в процессе эксплуатации при проведении поверочных работ и позволяет при необходимости оперативно корректировать математическую модель изменения во времени МХ аналоговых блоков, повышая уровень ее

адекватности реальным условиям функционирования ИИС. Система предназначена для оперативной поддержки принятия проектных, технических и эксплуатационных решений в области метрологического обеспечения блоков ИИС, исключая необходимость ручного выполнения трудоемких аналитических вычислений. Информационно-аналитическая система не только автоматизирует сложные аналитические расчеты, но и формирует обоснованные инженерные рекомендации по метрологическому обслуживанию, что способствует повышению качества функционирования ИИС на всех этапах их жизненного цикла за счет реализации следующих стадий:

– построения математических моделей изменения во времени метрологических характеристик аналоговых блоков ИИС на основе априорной информации из БД по комплектующим элементам с использованием многофакторных математических моделей;

– проверки адекватности построенных моделей реальным процессам с применением статистических критериев, что позволяет оценить целесообразность их использования с учетом поставленной задачи прогнозирования и требуемого уровня МН;

– формирования рекомендаций по метрологическому обслуживанию, включая расчет межповерочных интервалов на основе условия постоянства степени накопления метрологической нестабильности [3];

– расчета показателей качества прогнозирования МН и оптимального выбора математической модели изменения МХ во времени на их основе [1, 4];

– коррекции (при необходимости) многофакторной математической модели для уточнения оценки значений метрологического ресурса $t_{\text{р}}^{*}$, с последующим контролем уровня метрологической исправности на этапе эксплуатации.

Заключение

Таким образом, использование информационно-аналитической системы на этапах проектирования и эксплуатации позволяет комплексно оценивать метрологическую надежность как отдельных аналоговых блоков, так и измерительных каналов ИИС в целом, что позволяет решать задачи повышения метрологического уровня используемых измерительных средств путем внесения необходимых изменений в схемные и конструктивные решения проектируемых блоков и информационно-измерительной системы в целом.

Список литературы

1. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209–215.

2. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование электронных измерительных средств при оценке их метрологической надежности / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 770–775.

3. Чернышова, Т. И. Оценка достоверности прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 532–537.

4. Чернышова, Т. И. Оценка эффективности прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств/ Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 3(47). – С. 301–305.

Determination of Metrological Serviceability and Metrological Reliability of Information-Measurement Systems during Design and Operation

© M. A. Kamenskaya[1] ✉, P. I. Karelin[2], T. I. Chernyshova[2]

[1] *Department of Electric Power Engineering, art_mari@bk.ru;*
[2] *Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems, TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: analytical-probabilistic method; information-measurement system; mathematical model; machine learning; calibration interval; metrological serviceability; metrological reliability; metrological service life.

Abstract: The problem of determining the metrological serviceability and metrological reliability of analog units within information-measurement systems during the design and operation stages is addressed. A general algorithm is proposed, based on analytical-probabilistic forecasting of changes in metrological characteristics, taking into account component parameters and external influencing factors. At the design stage, a multifactorial mathematical model is constructed to evaluate the metrological service life and the predicted level of the unit's metrological serviceability. At the operation stage, calibration results are monitored, calibration intervals are determined, and experimental data are compared with calculated values. If discrepancies are detected, the mathematical model is adjusted using machine learning techniques and the stochastic tuning of correction coefficients.

References

1. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R. Yu. [Mathematical modeling of metrological characteristics in the assessment of the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 209-215. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Mathematical modeling of electronic measuring instruments for the assessment of their metrological reliability], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 770-775. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Assessing the reliability of forecasting metrological reliability of electronic measuring device], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 532-537. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Assessing the reliability of forecasting the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2013, no. 3(47), pp. 301-305. (In Russ., abstract in Eng.)

Bestimmung der messtechnischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Informations- und Messsystemen während ihrer Entwicklung und ihres Betriebs

Zusammenfassung: Dieser Artikel untersucht die Bestimmung der messtechnischen Einsatzfähigkeit und Zuverlässigkeit analoger Einheiten von Informations- und Messsystemen in der Entwurfs- und Betriebsphase. Es ist ein allgemeiner Algorithmus vorgeschlagen, der auf analytischer und probabilistischer Prognose von Änderungen messtechnischer Eigenschaften basiert und die Parameter der Elementbasis sowie externe Einflussfaktoren berücksichtigt. In der Entwurfsphase ist ein multifaktorielles mathematisches Modell erstellt, um die messtechnischen Ressourcen und die prognostizierte messtechnische Einsatzfähigkeit der Einheit zu bewerten. Während der Betriebsphase waren die Verifizierungsergebnisse überwacht, die Verifizierungsintervalle festgelegt und die experimentellen Daten mit den berechneten Werten verglichen. Bei festgestellten Abweichungen wird das mathematische Modell mithilfe von maschinellem Lernen und stochastischer Anpassung der Korrekturkoeffizienten korrigiert.

Détermination de l'intégrité métrologique et de la fiabilité métrologique des systèmes d'information et de mesure dans leurs conception et exploitation

Résumé: Est examinée la problématique de la détermination de l'intégrité métrologique et de la fiabilité métrologique des blocs analogues des systèmes d'information et de mesure aux étapes de conception et d'exploitation. Est proposé un algorithme general fondé sur une prévision analytique et probabiliste des modifications des caractéristiques métrologiques en tenant compte des paramètres de la base électronique et des facteurs externes influençants. À l'étape de la conception, est élaborée une modélisation mathématique multifactorielle permettant d'évaluer la durée de vie métrologique et le niveau prévisible d'intégrité métrologique du bloc. Lors de la phase d'exploitation, est effectué le contrôle des résultats des verifications; sont déterminés les intervalles entre les verifications; sont comparées les données expérimentales aux valeurs calculées. En cas d'écart détecté, est prévue une correction du modèle mathématique en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique et un ajustement stochastique des coefficients correctifs.

Авторы: ***Каменская Мария Анатольевна*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика»; ***Карелин Павел Игоревич*** – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; ***Чернышова Татьяна Ивановна*** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.