

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРОВЕДЕНИЯ ЕЕ ПОВЕРОК РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ

Ю.А. Кувыкин¹

original.rus@mail.ru

Н.А. Минагуреев¹

minagureev99@mail.ru

В.В. Супрунюк¹

3260vvs@mail.ru

Р.З. Хайруллин^{1,2,3}

zrkzrk@list.ru

¹ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи, Московская обл.,
Российская Федерация

²МГСУ, Москва, Российская Федерация

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Оценка готовности современной измерительной техники к применению по назначению основана на результатах наблюдения за множеством параметров, статистика выхода за поле допуска которых базируется на различных законах распределения. Поставлена задача — определить эффективность метрологического обеспечения измерительной техники, применяя теорию полумарковских моделей процесса их эксплуатации. Предложена полумарковская модель процесса эксплуатации измерительной техники с возможностью проведения ее проверок разными способами. Модель отражает стационарный процесс эксплуатации измерительной техники, в котором установленная на объекте измерительная техника может быть поверена отличающимися по процедуре исполнения способами (с демонтажем или без демонтажа, с использованием эталонов или встроенных мер). Приведены граф переходов измерительной техники в процессе эксплуатации в разных состояниях и матрица вероятностей переходов состояний, а также рассчитаны коэффициенты достоверности информации о состоянии измерительной техники и готовности ее к применению по назначению. Из приведенных результатов моделирования процесса эксплуатации измерительной техники следует, что комбинируя разные способы проверок, можно обеспечить необходимые значения коэффициентов достоверности

Ключевые слова

Полумарковская модель, измерительная техника, поверка, коэффициент готовности, коэффициент достоверности, матрица вероятностей переходов

Введение. Основным этапом метрологического обеспечения измерительной техники (ИТ) является организация ее поверок. Особое внимание при эксплуатации ИТ уделяется вопросам проведения периодических поверок [1–4]. Задача управления показателями эффективности метрологического обеспечения ИТ в процессе эксплуатации приобретает актуальное значение [5–8]. Современные требования по повышению эффективности принимаемых управленческих решений, направленных на повышение готовности ИТ к применению по назначению, обусловили необходимость разработки моделей эксплуатации ИТ, учитывающих возможные варианты метрологического обеспечения в части поверок [9–12].

Материалы и методы решения задач. Коэффициент готовности ИТ к применению по назначению вычисляется по формуле [1]

$$K_r = \frac{\sum_i \pi_i w_i}{\sum_i \pi_i v_i}, \quad (1)$$

где π_i — относительная доля числа шагов, при которых ИТ находится в состоянии E_i ; w_i — математическое ожидание времени работы ИТ в состоянии E_i ; v_i — математическое ожидание времени пребывания ИТ в состоянии E_i . При этом $\sum_i \pi_i = 1$, $v_i = \sum_i P_{ij} M(\tau_{ij}) = \sum_i P_{ij} \int_0^{\infty} \tau_{ij} dF(\tau_{ij})$, $w_i = v_i$ и $w_i = 0$ (для рабочих и нерабочих состояний ИТ), где P_{ij} — элементы матрицы вероятностей переходов состояния $P^* = \|P_{ij}^*\|$; $F^*(\tau_{ij})$ — функция распределения вероятностей переходов; $M(\tau_{ij})$ — математическое ожидание времени перехода; τ — время.

В процессе эксплуатации ИТ периодически подвергается поверкам [13–16]. Предполагается, что поверки могут быть выполнены разными способами. После поверки ИТ или годна к применению, или ее направляют в ремонт для восстановления [17–20].

Процесс эксплуатации ИТ с разными способами поверок можно представить в виде графа переходов из возможных состояний (рис. 1).

Пусть $E = (E_1, E_{11}, E_2, E_{22}, E_3, E_{33}, E_4, E_5, E_{55}, E_6, E_{66}, E_7, E_{77}, E_8)$ — вектор возможных состояний ИТ, где E_1, E_{11} — работоспособные состояния после поверок первым (ПП) и вторым (ВП) способами; $E_2,$

где α_i — условная вероятность ложного отказа ИТ при поверках разными способами; γ — вероятность отказа; $\delta, (1-\delta)$ — доли ИТ, направляемые на ВП и ПП; β_i — условная вероятность необнаруженного отказа ИТ при поверках разными способами; ν — коэффициент восстановления ИТ после ремонта и поверки (достаточно большая относительная величина $\nu = 0,98$).

На рис. 1 введены следующие обозначения: ε — достаточно малая относительная величина ($\varepsilon = 0,01$); T_k, T_{kk} — интервалы времени между двумя очередными ПП и ВП; t_k, t_{kk} — продолжительности ПП и ВП ($F(\tau)$ — интегральная функция распределения времени отказа; $F(T_k), F(T_{kk})$ — вероятности отказов за время между двумя очередными ПП и ВП).

Также не равны нулю все диагональные элементы матрицы вероятностей переходов: $p_{1,1} = -1$; $p_{11,11} = -1$; $p_{2,2} = -1$; $p_{22,22} = -1$; $p_{3,3} = -1$; $p_{33,33} = -1$; $p_{4,4} = -1$; $p_{5,5} = -1$; $p_{55,55} = -1$; $p_{6,6} = -1$; $p_{66,66} = -1$; $p_{7,7} = -1$; $p_{77,77} = -1$; $p_{8,8} = -1$.

Принимается, что продолжительности поверки и восстановления являются детерминированными величинами, равными соответственно t_k, t_{kk} и t_v .

Учитывая, что $w_1 = \nu_1, w_2 = 0, w_3 = 0, w_4 = 0, w_5 = 0, w_6 = 0$, и подставляя приведенные выражения в уравнение (1), получаем расчетные формулы для коэффициентов готовности и достоверности информации о состоянии ИТ:

$$K_{\Gamma} = \pi_1 w_1 / \sum_i \pi_i \nu_i; \quad K_{\Gamma\Gamma} = (\pi_1 w_1 + \pi_{11} w_{11}) / \sum_i \pi_i \nu_i;$$

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

где $K_{\Gamma}, K_{\Gamma\Gamma}$ — коэффициенты готовности ИТ, определенные по результатам ПП и результатам ПП и ВП; D_1, D_2 — коэффициенты достоверности информации о состоянии работоспособной и отказавшей ИТ.

При проведении поверок ИТ учитываем вероятности ложного и необнаруженного отказов [1]. Относительная погрешность измерений контролируемого при поверках параметра R определяется по формуле $R = \Delta_x / \Delta_I$, где Δ_x — суммарная погрешность измерения контролируемого параметра; Δ_I — допуск на контролируемый параметр.

Зависимости вероятностей ложного α и необнаруженного β отказов от относительной погрешности измерения R в случае нормального закона распределения погрешности контролируемого параметра [1] приведены на рис. 2.

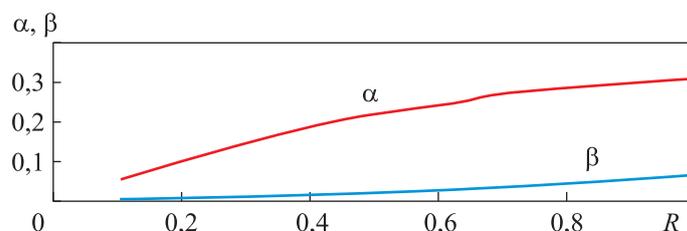


Рис. 2. Зависимости вероятностей ложного α и необнаруженного β отказов от относительной погрешности измерения R

С увеличением относительной погрешности измерения R вероятности ложного и необнаруженного отказов увеличиваются, т. е. при проведении ВП число ошибок при принятии решения о состоянии ИТ будет больше, чем при ПП.

Результаты моделирования процесса эксплуатации ИТ. Расчеты проводились для разных возможных значений основных показателей модели эксплуатации ИТ. Зависимости $K_{ГТ}$ от доли δ ИТ, направляемой на ВП, при разных значениях R приведены на рис. 3, а. С увеличением доли ИТ, направляемой на ВП, коэффициент $K_{ГТ}$ увеличивается. Увеличение R

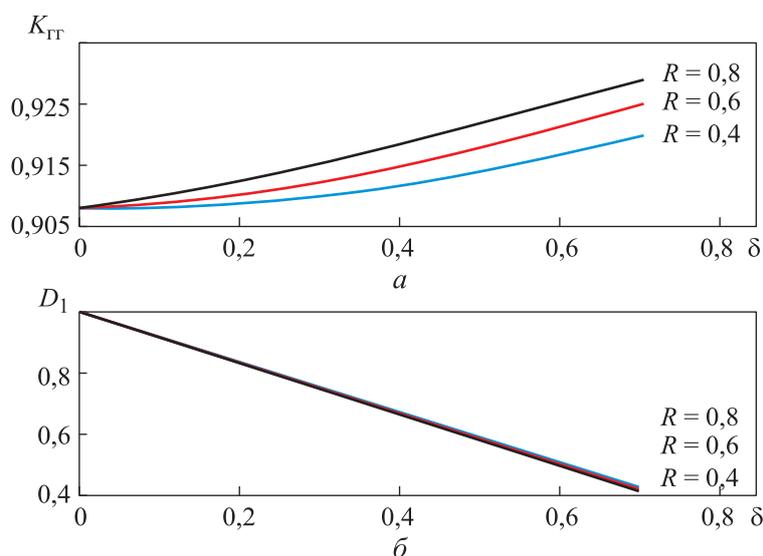


Рис. 3. Зависимости $K_{ГТ}$ (а) и D_1 (б) от доли δ ИТ, направляемой на ВП, при разных значениях R

также приводит к увеличению $K_{гг}$. Зависимости D_1 от доли δ ИТ, направляемой на ВП, при разных значениях R приведены на рис. 3, б.

Согласно зависимости на рис. 3, б, D_1 уменьшается и влияние R на D_1 незначительно. Зависимости оптимального T_k от доли δ ИТ, направляемой на ВП, при разных значениях R приведены на рис. 4. С увеличением доли ИТ, направляемой на ВП, значение T_k уменьшается. Структура коэффициента $K_{гг}$ приведена на рис. 5. С увеличением доли ИТ, направляемой на ВП, первое слагаемое $\pi_1 w_1$ уменьшается, второе слагаемое $\pi_{11} w_{11}$ и коэффициент $K_{гг}$ увеличиваются.

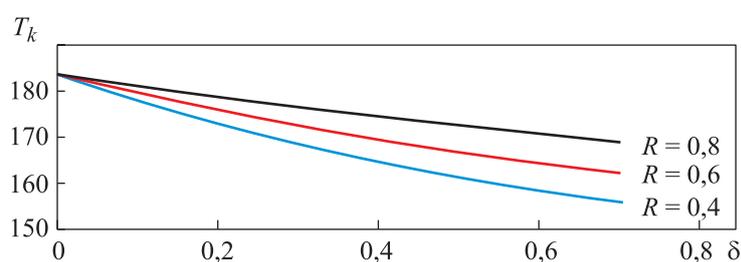


Рис. 4. Зависимости оптимального T_k от доли δ ИТ, направляемой на ВП, при разных значениях R

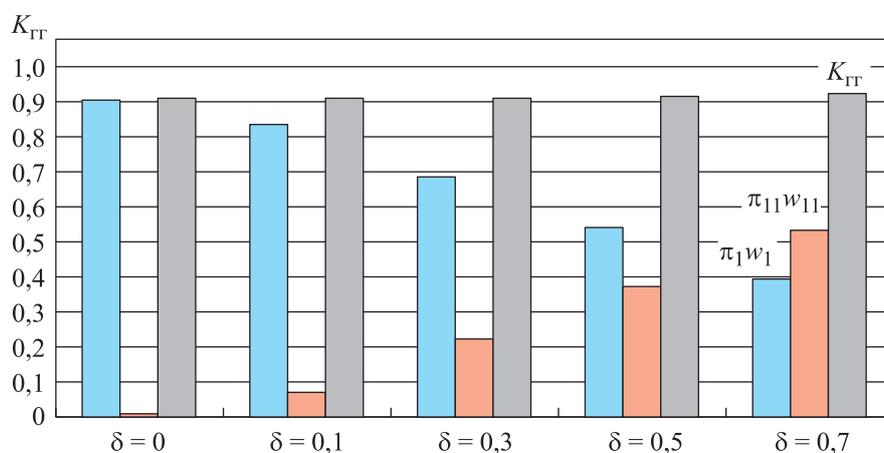


Рис. 5. Структура коэффициента $K_{гг}$

Обсуждение полученных результатов. Отличие приведенных результатов от данных из [19–21] заключается в том, что в предложенной полумарковской модели введен показатель достоверности информации о состоянии ИТ, имеющий важное значение для автономного функционирования объекта, на котором она установлена. Предлагаемая полумарковская модель позволяет одновременно получить оценки по двум показателям: коэффициентам достоверности информации о состоянии ИТ

и готовности ее к применению по назначению. При этом исследованы структуры коэффициентов готовности долей ИТ, направляемых на поверку разными способами. Полученные результаты в части совместного моделирования коэффициентов достоверности информации о состоянии ИТ и готовности ее к применению по назначению являются ключевыми при принятии решения о выборе режима функционирования объекта.

Заключение. Предложена полумарковская модель эксплуатации ИТ с возможностью проведения ее проверок разными способами. Модель отражает стационарный процесс эксплуатации, когда ИТ может быть поверена отличающимися по процедуре исполнения способами (с демонтажем или без демонтажа, с использованием эталонов или встроенных мер). Показано, что, выбирая разные способы поверки, можно обеспечить решение задач их метрологического обеспечения на необходимом уровне.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ershov D.S., Galishnikov A.A., Khayrullin R.Z. Simulation of operation of complex technical systems with metrological support. *AIP Conf. Proc.*, 2023, vol. 2791, art. 050017. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0143597>
- [2] Хайруллин Р.З., Галишников А.А., Бойцова О.И. Модель эксплуатации измерительной информационной системы с цифровой обработкой сигналов. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2022, № 3, с. 195–201. EDN: UCCBES
- [3] Сычев Е.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. М., Воениздат, 1993.
- [4] Ершов Д.С., Хайруллин Р.З. Математическая модель рабочего места поверки средств измерений как нестационарная система обслуживания. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2022, т. 65, № 10, с. 701–711. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-10-701-711>
- [5] 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. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-22-27>
- [6] Хайруллин Р.З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники. *Вестник метролога*, 2023, № 1, с. 11–17. EDN: INGCCG
- [7] Ershov D.S., Malakhov A.V., Talalai A.V., et al. Analysis of operation models of complex technical systems. *Meas. Tech.*, 2023, vol. 66, no. 7, pp. 461–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02248-z>
- [8] Хайруллин Р.З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники. *Измерительная техника*, 2022, № 8, с. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-28-34>

- [9] Jiang D., Chen T., Xie J., et al. A mechanical system reliability degradation analysis and remaining life estimation method — with the example of an aircraft hatch lock mechanism. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2023, vol. 230, art. 108922.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108922>
- [10] Yan X., Tang G., Wang X. Bearing performance degradation assessment based on the continuous-scale mathematical morphological particle and feature fusion. *Measurement*, 2022, vol. 188, art. 110571.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110571>
- [11] Yan T., Lei Y., Li N., et al. Degradation modeling and remaining useful life prediction for dependent competing failure processes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2021, vol. 212, art. 107638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107638>
- [12] Воейко О.А., Попова Ю.С., Хайруллин Р.З. К проектированию сложных технических систем с метрологическим обеспечением. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2024, № 7, с. 92–97. EDN: CFFQCT
- [13] Romero E., Bérenguer Ch., Martinez J. Long-term degradation estimation of wind turbine drive-train under a gain-scheduling control strategy according to the weather conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no. 19, pp. 13–18.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.177>
- [14] Jantara V.L., Basoalto H., Papaelias M. A damage mechanics approach for lifetime estimation of wind turbine gearbox materials. *Int. J. Fatigue*, 2020, vol. 137, art. 105671.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105671>
- [15] Ершов Д.С., Хайруллин Р.З. Практическое применение моделей рабочих мест поверки средств измерений как нестационарных систем обслуживания. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2023, т. 66, № 12, с. 1023–1034.
DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-12-1023-1034>
- [16] Merainani B., Laddada S., Bechhoefer E., et al. An integrated methodology for estimating the remaining useful life of high-speed wind turbine shaft bearings with limited samples. *Renew. Energy*, 2022, vol. 182, pp. 1141–1151.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.062>
- [17] Romero E.E., Martinez J.J., Berenguer C. Degradation of a wind-turbine drive-train under turbulent conditions: effect of the control law. *5th SysTol.*, 2021, pp. 335–340.
DOI: <https://doi.org/10.1109/SysTol52990.2021.9595837>
- [18] Khayrullin R.Z. A probabilistic physico-chemical diffusion model of the key drifting parameter of measuring equipment. *Axioms*, 2024, vol. 13, no. 1, art. 41.
DOI: <https://doi.org/10.3390/axioms13010041>
- [19] Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., et al. Model of operation of computer measuring system. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2388, art. 012040.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2388/1/012040>
- [20] Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., et al. To simulating the functioning of workplace for the verification of measuring instruments. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2388, art. 012147. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2388/1/012147>

[21] Хайруллин Р.З., Никитина И.А. Исследование полумарковских моделей эксплуатации специальной техники. *Динамика сложных систем — XXI век*, 2019, т. 13, № 1, с. 5–12. EDN: ZIKUFN

Кувыкин Юрий Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13).

Минагуреев Никита Алексеевич — младший научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13).

Супрунюк Василий Владимирович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13).

Хайруллин Рустам Зиннатуллович — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13); доцент кафедры прикладной математики МГСУ (Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26); профессор кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кувыкин Ю.А., Минагуреев Н.А., Супрунюк В.В. и др. Полумарковская модель процесса эксплуатации измерительной техники с возможностью проведения ее проверок разными способами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 4 (153), с. 18–29. EDN: MMLQGF

**THE SEMI-MARKOV MODEL PROCESS OF OPERATION PRIMARY
MEASURING TRANSDUCERS OF COMPLEXES
WITH THE POSSIBILITY OF CARRYING OUT THEIR CHECKS
IN DIFFERENT WAYS**

Yu.A. Kuvykin¹

original.rus@mail.ru

N.A. Minagureev¹

minagureev99@mail.ru

V.V. Suprunyuk¹

3260vvs@mail.ru

R.Z. Khayrullin^{1, 2, 3}

zrkzrk@list.ru

¹ FSBI “MSHC” RFMD, Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation

² MGSU, Moscow, Russian Federation

³ BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The assessment of the readiness of modern measuring equipment for its intended use is based on the observation of a variety of parameters, the statistics of which exceed the tolerance field based on various distribution laws. The article formulates the task of determining the effectiveness of metrological support for measuring equipment using the theory of semi-Markov models of their operation. A semi-Markov model of the process of operation of measuring equipment with the possibility of carrying out its checks in various ways is proposed. The model reflects the stationary process of measuring equipment operation, when measuring equipment installed on an object can be verified in ways that differ in the execution procedure (with or without dismantling, using standards or built-in measures). A graph of transitions of measuring equipment during operation in different states and a matrix of probabilities of state transitions are given, the coefficient of reliability of information about the state of measuring equipment and the coefficient of its readiness for its intended use are calculated. According to the results of modeling the operation of measuring equipment, by combining checks carried out in different ways, it is possible to provide the necessary values of the reliability coefficients of information about the condition of measuring equipment and its readiness for its intended use to perform certain tasks

Keywords

Semi-Markov model, measuring equipment, verification, availability coefficient, reliability coefficient, transition probability matrix

Received 02.08.2024

Accepted 09.07.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Ershov D.S., Galishnikov A.A., Khayrullin R.Z. Simulation of operation of complex technical systems with metrological support. *AIP Conf. Proc.*, 2023, vol. 2791, art. 050017. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0143597>
- [2] Khayrullin R.Z., Galishnikov A.A., Boytsova O.I. Model of operation of computer measuring systems. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2022, no. 3, pp. 195–201 (in Russ.). EDN: UCCBES
- [3] Sychev E.I., Khramenkov V.N., Shkitin A.D. *Osnovy metrologii voennoy tekhniki* [Fundamentals of metrology of military equipment]. Moscow, Voenizdat Publ., 1993.
- [4] Ershov D.S., Khayrullin R.Z. Mathematical model of the workplace of measuring instruments verification as a non-stationary service system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2022, vol. 65, no. 10, pp. 701–711 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-10-701-711>

- [5] Mishchenko V.I., Kravtsov A.N., Mamleev T.F. A semi-Markov model of the functioning of redundant measuring instruments relative to the frequency of verification. *Meas. Tech.*, 2021, vol. 64, no. 4, pp. 289–295.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01931-3>
- [6] Khayrullin R.Z. Semi-Markov model of operation and updating the measuring equipment fleet. *Vestnik metrologa*, 2023, no. 1, pp. 11–17 (in Russ.). EDN: INGCCG
- [7] Ershov D.S., Malakhov A.V., Talalai A.V., et al. Analysis of operation models of complex technical systems. *Meas. Tech.*, 2023, vol. 66, no. 7, pp. 461–474.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02248-z>
- [8] Khayrullin R.Z. Optimization of operational and renewal processes for a measuring equipment fleet. *Meas. Tech.*, 2022, vol. 65, no. 8, pp. 569–576.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02122-y>
- [9] Jiang D., Chen T., Xie J., et al. A mechanical system reliability degradation analysis and remaining life estimation method — with the example of an aircraft hatch lock mechanism. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2023, vol. 230, art. 108922.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108922>
- [10] Yan X., Tang G., Wang X. Bearing performance degradation assessment based on the continuous-scale mathematical morphological particle and feature fusion. *Measurement*, 2022, vol. 188, art. 110571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110571>
- [11] Yan T., Lei Y., Li N., et al. Degradation modeling and remaining useful life prediction for dependent competing failure processes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2021, vol. 212, art. 107638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107638>
- [12] Voeyko O.A., Popova Yu.S., Khayrullin R.Z. To design of complex technical systems with metrological support. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2024, no. 7, pp. 92–97 (in Russ.). EDN: CFFQCT
- [13] Romero E., Bérenguer Ch., Martinez J. Long-term degradation estimation of wind turbine drive-train under a gain-scheduling control strategy according to the weather conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no. 19, pp. 13–18.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.177>
- [14] Jantara V.L., Basoalto H., Papaalias M. A damage mechanics approach for lifetime estimation of wind turbine gearbox materials. *Int. J. Fatigue*, 2020, vol. 137, art. 105671.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105671>
- [15] Ershov D.S., Khayrullin R.Z. Practical application of workplace models for verification of measuring instruments as non-stationary service systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2023, vol. 66, no. 12, pp. 1023–1034 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-12-1023-1034>
- [16] Merainani B., Laddada S., Bechhoefer E., et al. An integrated methodology for estimating the remaining useful life of high-speed wind turbine shaft bearings with limited samples. *Renew. Energy*, 2022, vol. 182, pp. 1141–1151.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.062>

- [17] Romero E.E., Martinez J.J., Berenguer C. Degradation of a wind-turbine drive-train under turbulent conditions: effect of the control law. *5th SysTol.*, 2021, pp. 335–340. DOI: <https://doi.org/10.1109/SysTol52990.2021.9595837>
- [18] Khayrullin R.Z. A probabilistic physico-chemical diffusion model of the key drifting parameter of measuring equipment. *Axioms*, 2024, vol. 13, no. 1, art. 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/axioms13010041>
- [19] Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., et al. Model of operation of computer measuring system. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2388, art. 012040. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2388/1/012040>
- [20] Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., et al. To simulating the functioning of workplace for the verification of measuring instruments. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2388, art. 012147. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2388/1/012147>
- [21] Khayrullin R.Z., Nikitina I.A. Investigation of semi-Markov models of special equipment operation. *Dinamika slozhnykh system — XXI vek* [Dynamics of Complex Systems — XXI Century], 2019, vol. 13, no. 1, pp. 5–12 (in Russ.). EDN: ZIKUFN

Kuvykin Yu.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, FSBI “MSHC” RFMD (Komarova ul. 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006 Russian Federation).

Minagureev N.A. — Junior Researcher, FSBI “MSHC” RFMD (Komarova ul. 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006 Russian Federation).

Suprunyuk V.V. — Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, FSBI “MSHC” RFMD (Komarova ul. 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006 Russian Federation).

Khayrullin R.Z. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Leading Researcher, FSBI “MSHC” RFMD (Komarova ul. 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006 Russian Federation); Professor, Department of Applied Mathematics, MGSU (Yaroslavskoe shosse 26, Moscow, 129337 Russian Federation); Professor, Department of Information Processing and Control Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kuvykin Yu.A., Minagureev N.A., Suprunyuk V.V., et al. The semi-Markov model process of operation primary measuring transducers of complexes with the possibility of carrying out their checks in different ways. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 4 (153), pp. 18–29 (in Russ.). EDN: MMLQGF