

К ПОСТРОЕНИЮ ОЦЕНОК ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПАРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Р. З. Хайруллин

Хайруллин Рустам Зиннатулович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Главный научный метрологический центр Минобороны России; профессор кафедры фундаментального образования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; профессор кафедры «Системы обработки информации и управления», Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, тел. + 7 (926) 405-22-17; e-mail: zrkzrk@list.ru

Разработан метод оценивания технического состояния парка установленной на сложных технических системах измерительной техники, основанный на использовании результатов марковского моделирования процесса эксплуатации. Предложен средний интегральный показатель исправности парка. Описана система построения показателей достоверности контроля результатов измерений при поверке техники. Она учитывает случайный характер изменения определяющего параметра измерительной техники, погрешности его измерения и вероятность отказа техники в процессе поверки. Представлен метод построения оценки коэффициента готовности при совместном проведении плановой поверки и оперативного автоматизированного контроля состояния. Представлены результаты оценки количества исправных и условно-исправных образцов измерительной техники.

Ключевые слова: измерительная техника, поверка, оперативный автоматизированный контроль технического состояния, полумарковская модель эксплуатации.

TO CONSTRUCTION OF ASSESSMENTS OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE PARK OF MEASURING EQUIPMENT

R. Z. Khayrullin

Khayrullin Rustam Zinnatullovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leader Scientific Worker, Head Scientific Metrological Centre; Professor of Fundamental Education Department, Moscow State University of Civil Engineering; Professor of Information Processing and Control Systems department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation; phone: + 7 (926) 405-22-17; e-mail: zrkzrk@list.ru

The method has been developed for assessing the technical condition of the fleet of measuring equipment installed on complex technical systems, based on the use of the results of Markov modeling of the operation process. The average integral indicator of the serviceability of the measuring equipment fleet is proposed. The method of constructing indicators of reliability of control of measurement results during verification of measuring equipment is described. The method takes into account the random nature of the change in the determining parameter of the measuring equipment, the errors of its measurement and the probability of failure of the measuring equipment during the verification process. A method is presented for constructing an assessment of the readiness coefficient in the joint conduct of scheduled verification and operational automated condition monitoring. The results of estimating the number of serviceable and conditionally serviceable samples of measuring equipment are presented.

Keywords: measuring equipment, verification, operational automated monitoring of technical condition, semi-Markov operation model.

Промышленное и гражданское строительство определяет динамику экономического развития России, являясь одним из самых значимых его направлений. При реализации Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Россий-

ской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года возникает необходимость управления уникальными инновационными проектами и производственными системами с использованием высокотехнологичного оборудования [1–2], включающего контрольно-измерительные приборы, средства измерений

и измерительную технику (ИТ), которые подлежат метрологическому обслуживанию [3–5].

В штатном режиме эксплуатации ИТ, установленной на сложных технических системах (СТС), контроль состояния ИТ осуществляется путем периодических проверок (ПП), при которых проводится контроль нахождения определяющего параметра (ОП) ИТ в заданных пределах с требуемой точностью. В дополнение к ПП для контроля технического состояния может проводиться оперативный автоматизированный контроль состояния (ОАКС). ОАКС, по сравнению с периодическими проверками, имеет более низкое метрологическое качество (более высокую погрешность при измерении ОП), существенно меньшую периодичность и продолжительность. При метрологическом обеспечении парка измерительной техники с совместным применением периодических проверок и оперативного контроля состояния появляется возможность выделить в отдельную группу такие образцы ИТ, которые являются исправными по результатам ОАКС и, одновременно, являются неисправными по результатам ПП. В дальнейшем будем называть такие образцы ИТ условно-исправными. Из группы условно-исправных образцов ИТ вероятностно-статистическими методами могут быть выделены подгруппы исправных и неисправных образцов. Решение указанной задачи «полной идентификации» технического состояния имеет первостепенное значение при оценке достаточности ресурсов, необходимых для решения задач по применению СТС по назначению.

Задача управления показателями эффективности парка СТС с метрологическим обеспечением исследовалась в [6–18] с использованием марковских и полумарковских моделей. Однако в этих работах совместное влияние параметров ПП и ОАКС, проводимых в разных объемах, на показатели технического состояния парка ИТ и на коэффициент готовности парка ИТ не исследовалось.

Объектом исследования является парк ИТ, установленной на СТС. Предметом исследования являются процессы эксплуатации ИТ с метрологическим обеспечением. Основным методом исследования является метод математического моделирования процессов эксплуатации парка ИТ с метрологическим обеспечением.

Целью настоящей работы является разработка метода построения количественных оценок технического состояния парка ИТ и коэффициента готовности при совместном про-

ведении ПП и ОАКС с отдельным учетом исправных, неисправных и условно-исправных образцов ИТ на основе применения методов математического моделирования.

Метод расчета показателей достоверности контроля технического состояния измерительной техники

На рисунке 1 изображена схема, описывающая процесс принятия решения при контроле технического состояния измерительной техники [6].

На схеме через P_1 обозначена вероятность отсутствия отказа ИТ до начала контроля, q – вероятность отказа в процессе контроля.

Условные вероятности ложного α^* и необнаруженного β^* отказов при контроле состояния ИТ вычисляются по формулам:

$$\alpha^* = 1 - \frac{P_1(1-q)(1-\alpha)}{(1-q)[P_1(1-\varepsilon) + (1-P_1)\beta] + q\beta}$$

$$\beta^* = \frac{P_1q + (1-P_1)\beta}{P_1q\beta + (1-P_1)(1-q)\beta} \quad (1)$$

Приведенная на рисунке 1 схема и формула (1) применяются как при периодических проверках, так и при оперативном автоматизированном контроле состояния.

Обозначим $f(x)$ – функцию плотности распределения определяющего параметра техники, $f_1(x)$ – функцию плотности распределения погрешности измерения ОП при ПП, $f_2(x)$ – функцию плотности распределения погрешности измерения параметра при ОАКС. Эти функции изображены на рисунке 2.

Здесь x_H, x_B – нижнее и верхнее значение допуска на определяющий параметр (при $x_H \leq x \leq x_B$ – образец считается исправным, а при $x_B > x$ или $x_H > x$ – неисправным), y_{H1}, y_{B1} – нижняя и верхняя границы погрешности при периодических проверках, y_{H2}, y_{B2} – нижняя и верхняя граница погрешности при оперативном автоматизированном контроле состояния

Формулы для условных вероятностей ложного и необнаруженного отказа при марковском моделировании имеют вид [6–9]:

$$\alpha_i = \frac{P_{ЛО}(i)}{\int_{x_H}^{x_B} f(x) dx}, \quad \beta_i = \frac{P_{НО}(i)}{\int_{-\infty}^{x_H} f(x) dx + \int_{x_B}^{\infty} f(x) dx} \quad (2)$$

где

$$P_{ЛО}(i) = \int_{x_H}^{x_B} f(x) \left[\int_{-\infty}^{y_{H1}-x} f_i(y) dy + \int_{y_{B1}-x}^{\infty} f_i(y) dy \right] dx, \quad (3)$$

$$P_{НО}(i) = \int_{-\infty}^{x_H} f(x) \left[\int_{y_{H1}-x}^{y_{B1}-x} f_i(y) dy \right] dx + \int_{x_B}^{\infty} f(x) \left[\int_{y_{H1}-x}^{y_{B1}-x} f_i(y) dy \right] dx. \quad (4)$$

Приведенные формулы позволяют вычислить вероятности ложного и необнаруженного отказов при ПП ($i = 1$) и ОАКС ($i = 2$).

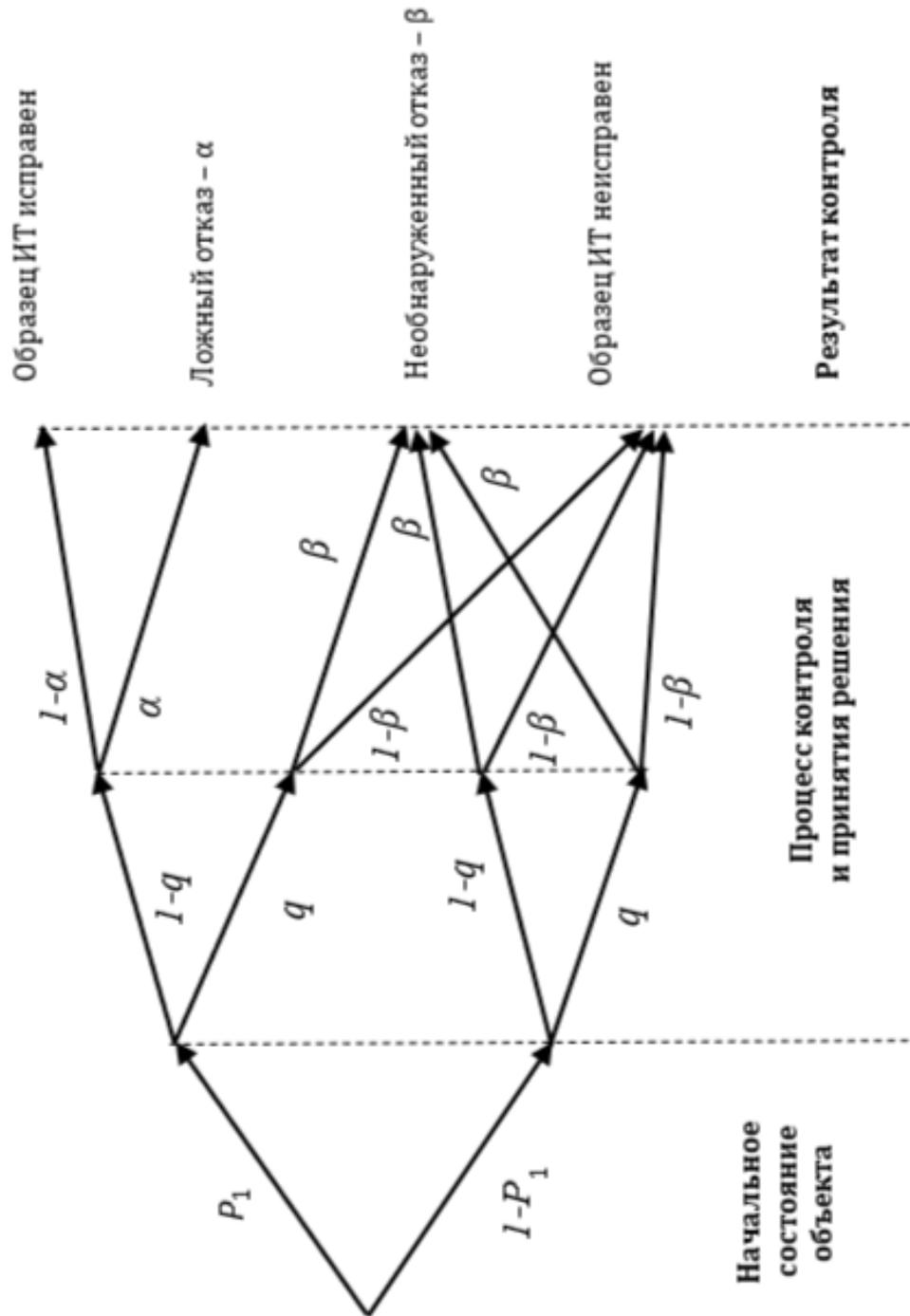


Рис. 1. Граф принятия решения при контроле технического состояния

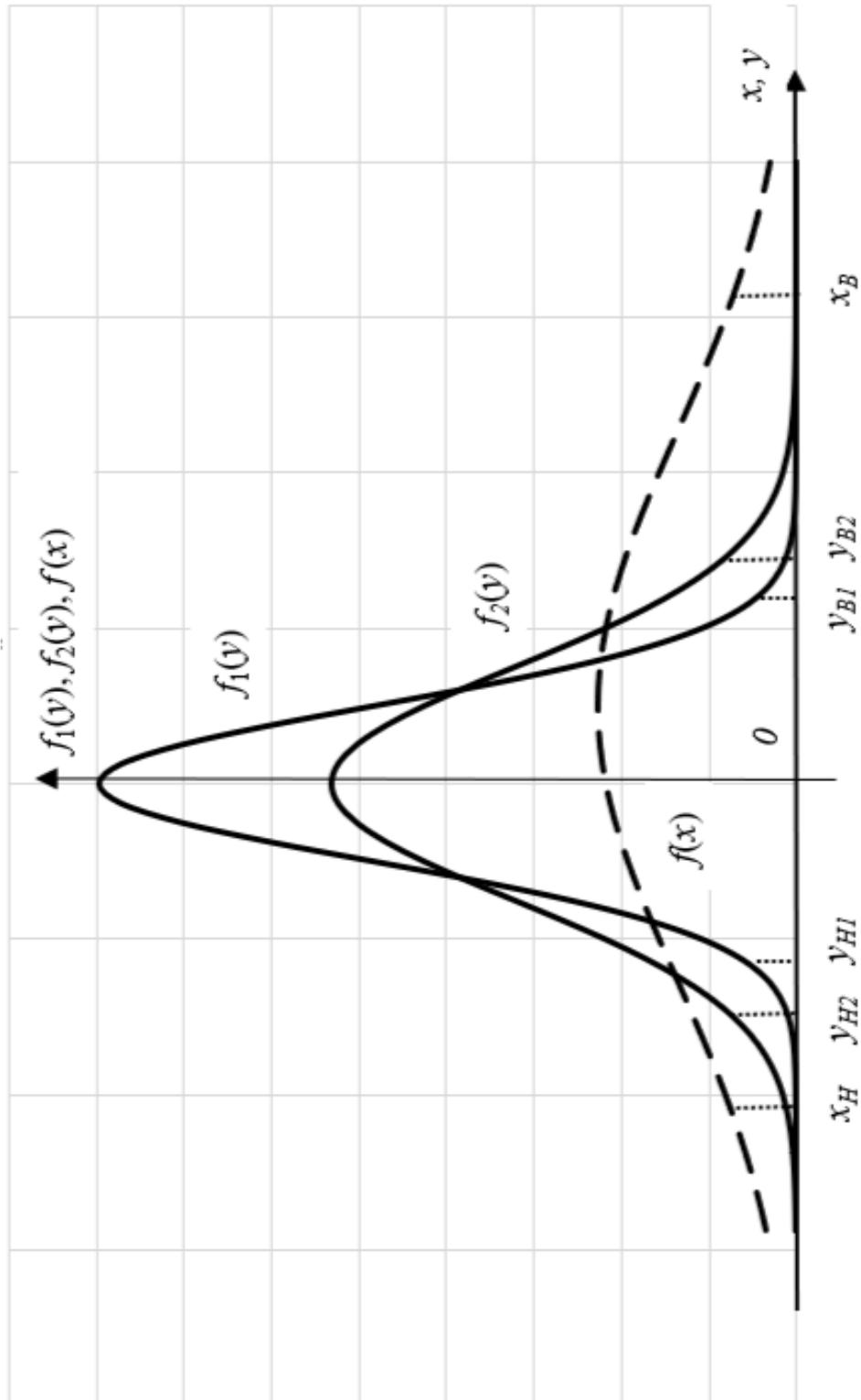


Рис. 2. К выводу формул для ложного и необнаруженного отказа при ПП и ОАКС

Как отмечалось выше, если сравнить результаты контроля технического состояния, проведенного с помощью периодической поверки и оперативного автоматизированного контроля состояния, то, в силу случайного характера изменения ОП образца измерительной техники, найдутся образцы ИТ, которые признаются исправными по результатам ОАКС и неисправными – по результатам ПП. Вероятность того, что образец техники условно-исправен, равна:

$$P(\text{УИ}) = \int_{x_H}^{x_B} f_{\text{ИТ}}(x) \left[\int_{-\infty}^{y_H-x} f_1(y) dy + \int_{y_B-x}^{\infty} f_1(y) dy - \int_{-\infty}^{y_{H1}-x} f_2(y) dy - \int_{y_{B1}-x}^{\infty} f_2(y) dy \right] dx. \quad (5)$$

Метод построения оценки количества исправных образцов измерительной техники

Количество исправных образцов $N_{\text{Исп}}$ будем оценивать по формуле:

$$N_{\text{Исп}} = [N \cdot K_{\Gamma}], \quad (6)$$

где N – общее количество образцов в парке измерительной техники, K_{Γ} – коэффициент готовности [6–9].

Для моделирования процесса эксплуатации парка ИТ используется стационарная полумарковская N_s – мерная модель с состояниями $\{E_n, n = 1, 2, \dots, N_s\}$, N_s – количество состояний системы. Коэффициент $K_{\Gamma\Gamma}$ готовности сложных технических систем (с учетом исправных и условно-исправных образцов техники) представим в виде суммы:

$$K_{\Gamma\Gamma} = K_{\Gamma1} + K_{\Gamma2}, \quad (7)$$

где $K_{\Gamma1} = \pi_1 w_1 / \sum_n \pi_n w_n$ – составляющая коэффициента готовности, учитывающая только периодические поверки, $K_{\Gamma2} = \pi_2 w_2 / \sum_n \pi_n w_n$ – составляющая коэффициента готовности, учитывающая только оперативный автоматизированный контроль состояния, π_n – стационарные вероятности нахождения образца ИТ с состоянием с номером n , w_n – среднее относительное время нахождения в состоянии π_n .

Формула (7) дает завышенную оценку количества исправных образцов техники, так как в ней в равной степени учитываются и исправные, и условно-исправные образцы ИТ.

Произведем корректировку суммарного коэффициента готовности (7). Вследствие случайного характера изменения определяющего параметра и погрешности измерения, а также в связи с тем, что погрешность измерения в несколько раз меньше допуска на контролируемый параметр, значительная часть образцов измерительной техники после проведения ОАКС будет иметь погрешность, не превышающую соответствующей погрешности после ПП.

Более корректной является формула:

$$K_{\Gamma\Gamma} = K_{\Gamma1} + \xi(\delta_{\Pi}, R_1, R_2) \cdot K_{\Gamma2}, \quad (8)$$

где корректировочный коэффициент:

$$\xi(\delta_{\Pi}, R_1, R_2) = 1 - (1 - \alpha_1)/(1 - \alpha_2), \quad (9)$$

показывающий долю ИТ, поверенную с помощью автоматизированного контроля состояния, которая по погрешности (точности) определения ОП эквивалентна доле технике, поверенной с помощью ПП. Здесь $R_i = \Delta_{\Sigma i} / \delta_{\Pi}$ – относительная погрешность измерения при периодической поверке (если $i = 1$) и при оперативном автоматизированном контроле состояния (если $i = 2$); $\Delta_{\Sigma i}$ – суммарная предельная погрешность измерения при ПП (если $i = 1$) и при ОАКС (если $i = 2$); α_i – условная вероятность ложного отказа при $i = 1$ и $i = 2$; $\delta_{\Pi} = 0,5(x_B - x_H)$ – допуск на определяющий параметр. Отметим, что функция $\xi(\delta_{\Pi}, R_1, R_2)$ рассчитывается путем вычисления соответствующих двойных интегралов от функций плотности распределения ОП и погрешности измерения (1)–(5).

Формула (9) зависит от погрешностей измерений при ПП и ОАКС, и расчет по этой формуле является трудоемким. Кроме того, не все технические параметры, необходимые для расчета, могут быть доступны исследователю. Если предположить, что погрешность измерения в два-три раза меньше допуска на определяющий параметр, то можно воспользоваться приближенной формулой:

$$\xi = \left(\int_{x_H+y_{H1}}^{x_B+y_{B1}} f(x) dx \right) / \left(\int_{x_H+y_{H2}}^{x_B+y_{B2}} f(x) dx \right). \quad (10)$$

Формула (10), по сравнению с (9), является более простой. Она уже не зависит от функций плотности распределения погрешностей при периодической поверке и оперативном автоматизированном контроле состояния, не зависит от вида измерения, технических параметров измерительного процесса, а зависит только от надежностных характеристик исправительной техники.

В качестве среднего интегрального показателя исправности парка ИТ будем использовать коэффициент готовности [6–9] – отношение количества исправных образцов к общему количеству образцов техники в произвольный момент времени t . Отметим, что исследованию коэффициента готовности посвящено значительное число работ [6–14]. Количество исправных образцов рассчитывается по формуле (9).

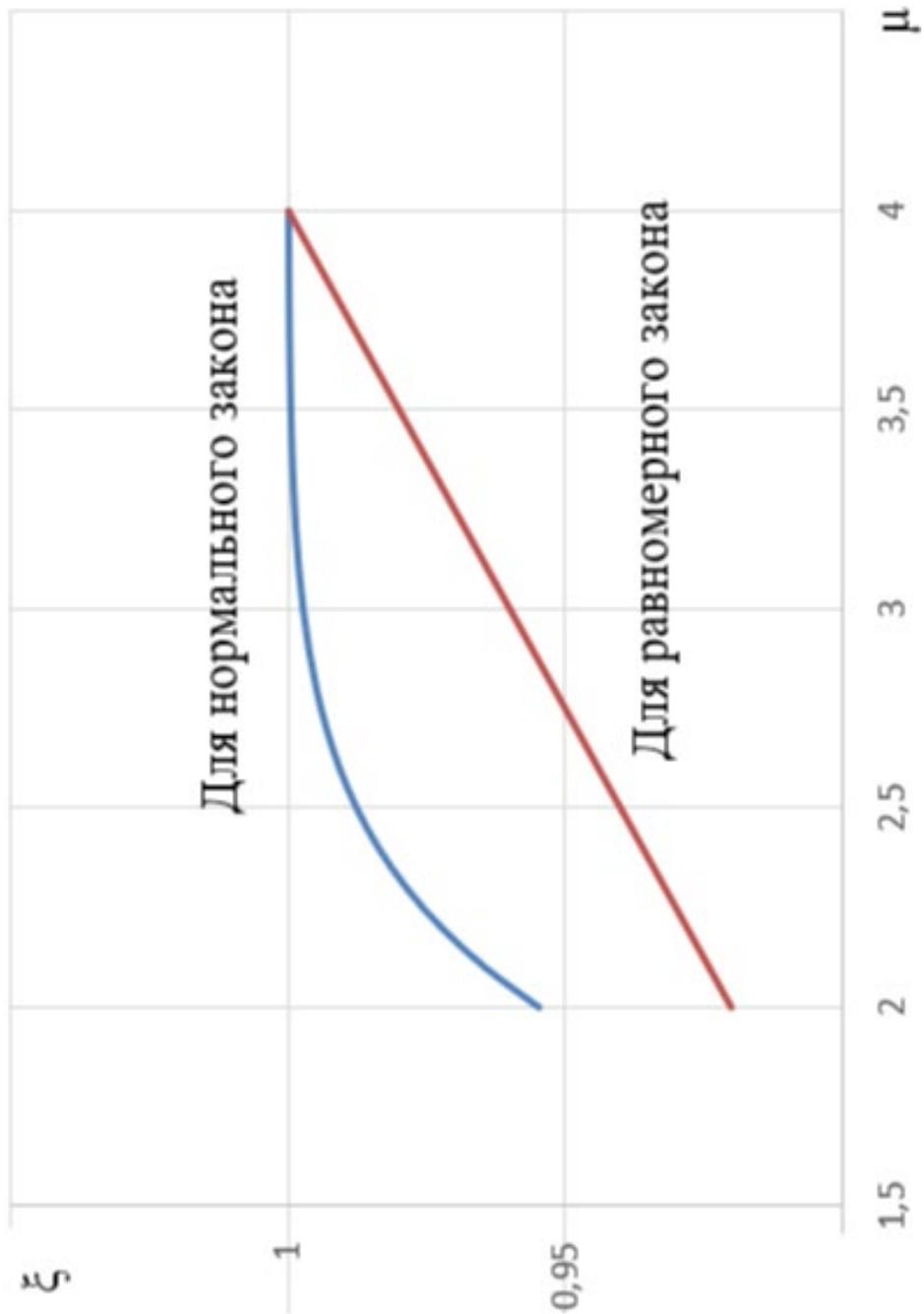


Рис. 3. Зависимость коэффициента ξ от безразмерной величины η для разных законов распределения погрешности измерения

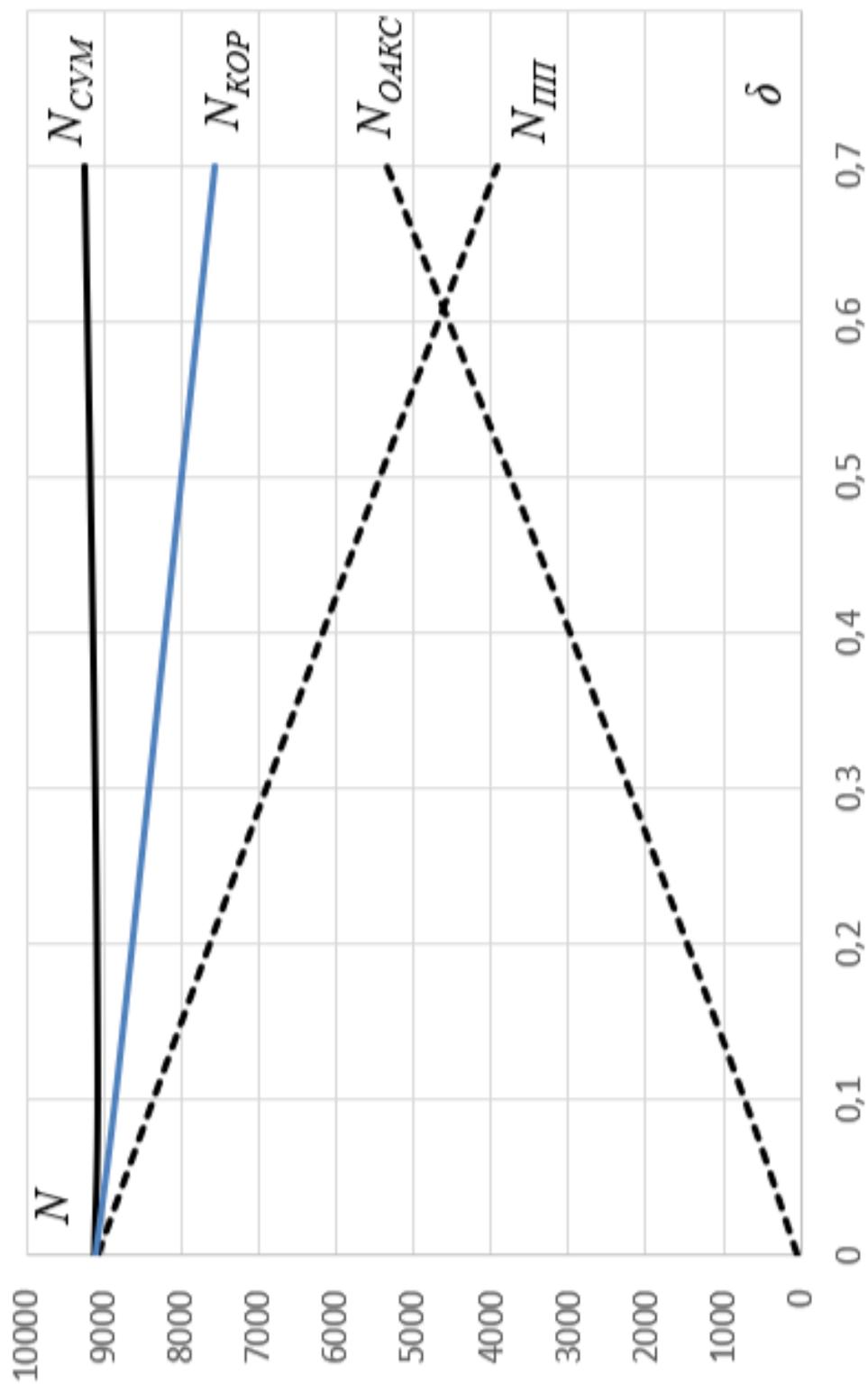


Рис. 4. К оценке количества исправных и условно-исправных образцов для парка ИТ

Результаты расчетов

Расчеты проводились по формуле (9) для случая, когда определяющий параметр распределен по нормальному закону. На рисунке 3 показана зависимость корректировочного коэффициента ξ от безразмерного $\mu = R_2/R_1$, характеризующего отношение погрешностей измерения при оперативном автоматизированном контроле состояния и периодической проверке для нормального и равномерного законов распределения.

Видно, что с приближением погрешности ОАКС к ПП корректировочный коэффициент стремится к единице.

Количественная оценка технического состояния проводилась для парка, включающего 10000 образцов измерительной техники. На рисунке 4 для парка ИТ, имеющего стационарный коэффициент готовности 0,908, показано количество признанных исправными образцов по результатам периодических проверок – $N_{ПП}$, признанных исправными (условно-исправными) по результатам автоматизированного контроля состояния – $N_{ОАКС}$, а также суммарное $N_{СУММ}$ и скорректированное $N_{КОР}$ количество исправных образцов в зависимости от относительного объема δ ОАКС в общем объеме поверочных работ.

Видно, что с увеличением относительного объема оперативном автоматизированном контроле состояния суммарное количество исправных и условно-исправных образцов

увеличивается, а скорректированное количество исправных образцов уменьшается с меньшей интенсивностью, чем количество исправных образцов по результатам периодических проверок.

Заключение

Предложен метод построения показателей достоверности контроля результатов измерений при проверке установленной на сложных технических системах измерительной техники с метрологическим обеспечением. Разработана система оценивания технического состояния парка ИТ, представлена техника построения оценки коэффициента готовности при совместном проведении периодических проверок и оперативного автоматизированного контроля состояния. Даны результаты моделирования. Из приведенных результатов моделирования процесса эксплуатации сложных технических систем с измерительной техникой, требующих метрологическое обслуживание можно заключить, что управление объемами ИТ, направляемыми на проверку разными способами (периодическую или оперативный автоматизированный контроль состояния), можно управлять как суммарным, так и скорректированным коэффициентом готовности. Все это позволяет обеспечить выполнение требуемых соотношений между количеством исправных и условно-исправных образцов измерительной техники, которые необходимы для решения конкретных задач, стоящих перед сложными техническими системами.

Список литературы

1. Бакунов Ю. О. Внедрение инновационных технологий в управление строительной и специальной техникой / Ю. О. Бакунов, Е. Ю. Васильева // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2022. – Т. 17. – Вып. 6. – С. 813–822.
2. Семенова Э. Е. Использование тепловых насосов для повышения энергоэффективности гражданских зданий / Э. Е. Семенова, Т. В. Богатова, А. В. Исанова, М. В. Рубцова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1 (39). – С. 29–32.
3. Хайруллин Р. З. К оптимальному управлению показателями эффективности парка измерительной техники / Р. З. Хайруллин // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2017. – № 5. – С. 564–571.
4. Хайруллин Р. З. Трехпараметрическая диффузионная модель отказов контрольно-измерительных приборов / Р.З. Хайруллин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 3. – С. 114–118.
5. Хайруллин Р. З. К построению функции плотности распределения вероятности безотказной работы контрольно-измерительной техники / Р.З. Хайруллин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 2. – С. 128–132.
6. Сычев Е. И. Оценка эффективности и параметрический синтез метрологического обеспечения радиоаппаратуры / Е. И. Сычев. – Москва : МО СССР, 1984. – 386 с.
7. Королик В. С. Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королик, А. Ф. Турбин. – Киев : Наукова думка, 1976. – 236 с.
8. Герцбах И. Б. Модели профилактики / И. Б. Герцбах. – Москва : Советское Радио, 1969. – 176 с.
9. Ершов Д. С. Моделирование метрологических систем / Д. С. Ершов, Р. З. Хайруллин. – Москва : Московский политех, 2024. – 206 с.
10. Хайруллин Р. З. Целевое управление показателями эффективности парка метрологического оборудования / Р. З. Хайруллин // Научное обозрение. – 2016. – № 10. – С. 300–303.

11. Мищенко В. И. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учетом периодичности поверки / В. И. Мищенко, А. Н. Кравцов, Т. Ф. Мамлеев // Измерительная техника. – 2021. – № 4. – С. 22–27.
12. Ершов Д. С. Анализ моделей эксплуатации сложных технических систем / Д. С. Ершов, А. В. Малахов, А. В. Талалай, Р. З. Хайруллин // Измерительная техника. – 2023. – № 7. – С. 15–23.
13. Хайруллин Р. З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники / Р. З. Хайруллин // Вестник метролога. – 2023. – № 1. – С. 11–17.
14. Хайруллин Р. З. Исследование полумарковских моделей эксплуатации специальной техники / Р. З. Хайруллин, И. А. Никитина // Динамика сложных систем – XXI век. – 2019. – Т. 13, № 1. – С. 5–12.
15. Мазур А. В. Метод повышения точности передачи единицы электрического сопротивления эталонам на основе переопределения температурных коэффициентов сопротивления в рабочем диапазоне температур / А. В. Мазур // Вестник метролога. – 2022. – № 2. – С. 9–12.
16. Дорохов А. Н. Полиномиальная модель технического состояния эталона единицы величины / А. Н. Дорохов, В. А. Ефремов, А. С. Швед // Вестник метролога. – 2022. – № 3. – С. 7–11.
17. Kornev A. S. Intelligent Regularized Measurement Procedure Based on the Use of a Dynamic Model of the Combined Maximum Principle and the Theory of Regularization / A. S. Kornev, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. S. Kornev, R. Z. Khayrullin // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1029, № 012083. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1>.
18. Khayrullin R. Z. A Probabilistic Physico-Chemical Diffusion Model of the Key Drifting Parameter of Measuring Equipment / R. Z. Khayrullin // Axioms. – 2024. – № 13 (1). – P. 41. – <http://doi.org/10.3390/axioms13010041>.
19. Боровой В. В. Математические модели погрешности измерения основной кривой намагничивания листовой электротехнической стали / В. В. Боровой, О. А. Наугольников, Д. А. Мыслимов, Д. В., Шахов, А. И. Киллер, И. М. Ланкин // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 8 (80). – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7173>.
20. Боев В. К. Портативный прибор для наладки, калибровки и поверки измерительных каналов, содержащих пьезоэлектрический преобразователь / В. К. Боев, В. К. Доля, А. К. Круглов, А. В. Фомушкин, А. Ю. Шаблицкий // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 3. – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/208>.
21. Костоготов А. А. Синтез систем фазовой автоподстройки частоты в условиях возмущений на основе модели объединенного принципа максимума и дискретного метода инвариантного погружения / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко, И. В. Пугачев // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 12. – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710>.
22. Андрашитов Д. С. Универсальный метод синтеза оптимальных управлений нелинейными Лагранжевыми динамическими системами / Д. С. Андрашитов, А. А. Костоготов, А. И. Костоготов, С. В. Лазаренко, Б. М. Ценных // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 1. – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2251>.
23. Neama S. Comparison of fuzzy semi-Markov models for one unit with mixed standby units with and without preventive maintenance using regenerative point method / S. Neama, T. Youssef // Heliyon7. – 2021. – P. e07717. – <https://www.sciencegate.app/document/10.1016/j.heliyon.2021.e07717>.

© Р. З. Хайруллин

Ссылка для цитирования:

Хайруллин Р. З. К построению оценок технического состояния парка измерительной техники // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 3 (49). С. 74–82.