

УДК 681.518.9; 621.384.3

DOI 10.24412/2413-7383-2025-2-37-60-65

S. S. Antsyferov, K. N. Fazilova, D. S. Muravyov
MIREA – Russian Technological University, c. Moscow, Russia
Russia, 119454, c. Moscow, Vernadsky ave., 78

INTELLIGENT QUALITY CONTROL SYSTEMS FOR HIGH-TECH MANUFACTURING PROCESSES AND EQUIPMENT

С. С. Анцыферов, К. Н. Фазилова, Д. С. Муравьев
МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия
119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 78

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ НАУКОЁМКОГО ПРОИЗВОДСТВА

In the article, a methodology for quality management of technological processes and equipment in high-tech production is proposed. Practical testing of this methodology has shown its applicability when comparing the current situation with previously calculated options from the tree of all quality states.

Keywords: methodology, quality management, technological process, technological equipment, neural network, machine learning, quality control.

В статье предложена методология управления качеством технологических процессов и оборудования наукоёмкого производства. Практическая апробация данной методологии показала возможность ее использования при сопоставлении текущей ситуации с ранее просчитанными вариантами из дерева всех состояний качества.

Ключевые слова: методология, управление качеством, технологический процесс, технологическое оборудование, нейросеть, машинное обучение, контроль качества.

Introduction

The task of achieving a high level of quality in the functioning of technological processes (TP) and technological equipment in intelligent high-tech production (IHTP) can be addressed through continuous monitoring and forecasting of their states, as well as timely execution of production and preventive maintenance.

In this context, the development of a methodology and systems for quality management of technological processes and equipment becomes highly relevant. These systems should provide information not only about the actual state of the monitored processes and equipment but also offer predictions about the potential emergence of critical states.

The obtained information enables the establishment of clearer links between the procedures for planning scheduled maintenance and the actual (as well as forecasted) state of technological processes and equipment, which should ultimately enhance overall production efficiency.

The goal of this work is to develop a methodology for quality management of technological processes and equipment in intelligent high-tech production.

Quality Management Methodology

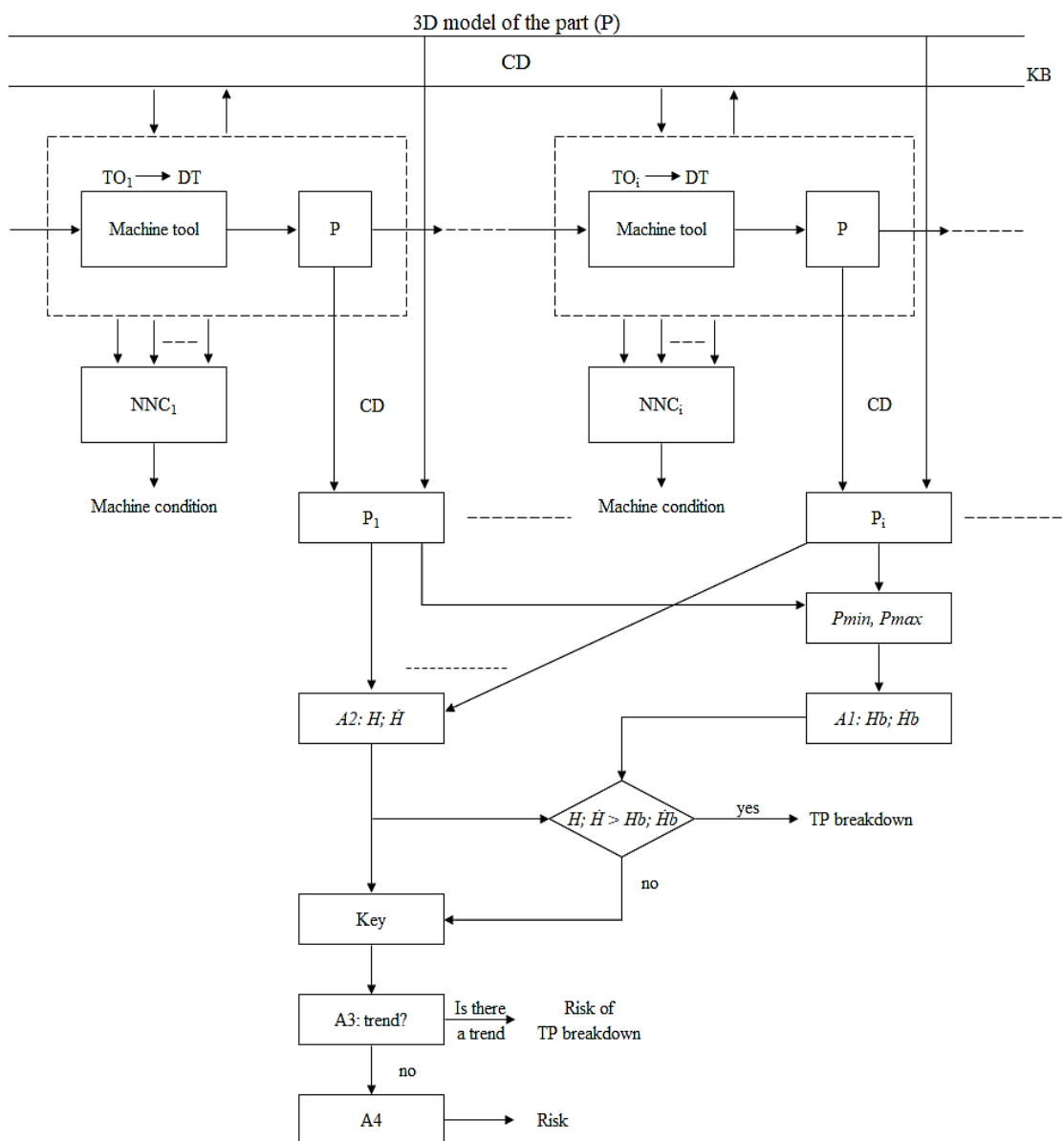
The methodology is based on the principle of comprehensive, multi-level quality control. The main levels are identified as follows (Fig. 1):

- * Quality control of technological equipment. The control element is a multi-layer neural network classifier (NNC) for equipment states. The NNC undergoes preliminary training on a dataset of equipment signals (machine learning mode), enabling it to distinguish between equipment states (optimal, good, etc.). The NNC serves as the foundation for a system of monitoring and forecasting the states of technological processes and equipment [1]. This system is integrated into the IIoT Istok platform, allowing for timely mitigation of factors that reduce product quality and enabling more precise organization of repair and preventive maintenance.

- * Quality control of technological operations (TO). To optimize TO, a digital twin (DT) is created based on a knowledge base (KB), and a 3D model of the processed part (P) is developed. After performing the TO, the controlled dimension (CD) is measured and compared with the 3D model, providing a probabilistic assessment of the operation's effectiveness, which serves as a measure of TO quality. The availability of probabilistic effectiveness measures for all operations allows for an overall assessment of the technological process quality.

- * Quality control of the technological process through evaluation of current quality indicators. For this purpose, interval values of probabilistic indicators (P_{min} , P_{max}) are determined in machine learning mode, and corresponding boundary quality indicators H and $\dot{H}$ are defined according to algorithm A1 [2], which are further determined by algorithm A2 [2]. The current indicators H and $\dot{H}$, obtained at each step of the TP, are compared with the boundary values (quality boundaries: H_b and $\dot{H}_b$). Exceeding these boundaries indicates a disruption in the TP.

- * Predictive quality control. Within the quality boundaries, algorithm A3, incorporating artificial intelligence elements, is used to identify trends (sustained movement of current indicators H and $\dot{H}$ toward a boundary value). If a trend is detected, a signal is issued about the risk of TP disruption. If no trend is found, statistical processing of the dataset is performed using algorithm A4 to determine the probability of TP disruption risk.



The practical implementation of the quality management system as a trainable neural network will enable the creation of a calculation matrix, allowing for the comparison of the current situation with pre-calculated scenarios from the tree of all quality states.

The proposed methodology facilitates the development of quality management systems for technological processes and equipment in intelligent high-tech production in the form of programmable modules. These modules enable the optimization of preventive maintenance plans based on machine learning. This serves as a solid foundation for achieving high-quality functioning of both technological equipment and technological processes as a whole.

Список литературы

1. Анцыферов С.С. и др. Система мониторинга и прогнозирования поведения оборудования на базе IIoT. *Автоматизация в промышленности*. 2024. № 3. С. 51-55.
2. Анцыферов С.С., Сигов А.С., Фазилова К.Н. Методология контроля функционирования неравновесно-устойчивых технических систем. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2021. №1 (20). С. 18-26.
3. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Русанов К.Е. Методика контроля качества технологических процессов интеллектуального машиностроительного производства. *Научные технологии*. 2023. Т.24. №7. С. 39-43.
4. Анцыферов С.С., Тихонов И.А. Интеллектуализация предприятий электронной промышленности и управление рисками. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. №4 (31). С. 29-39.
5. Анцыферов С.С., Фазилова К.Н., Русанов К.Е. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №2 (43). С. 37-44.
6. Солод В.С. Физико-математическая модель для разработки экспертной системы сортопрокатного производства. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №3 (34). С. 20-38.
7. Рылов С.А. Однопарный Ethernet T1S как основа интеллектуальных датчиков промышленного интернета вещей. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024. №4 (35). С. 222-232.
8. Фам К.Б., Мурашев П.М., Богатиков В.Н. Нечеткая модель диагностики технологических процессов. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2023. №3 (30). С. 76-86.
9. Бахтадзе Н.Н., Коньков А.Е., Елпашев Д.В., Кушнарв В.Н., Мухтаров К.С., Пуртов А.В., Пятацкий В.Е., Черешко А.А. Методы синтеза цифровых двойников на основе цифровых идентификационных моделей производственных процессов. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. №4. С. 100-111.
10. Аристова Н.И. Исследование компенсации брака при изготовлении партии узлов на гибких производствах. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2023. №1. С. 82-86.
11. Sahib R.H., Jawad D.H.M., Mtaasher A.K., Msad J.J. Network intrusion detection system using machinelearning models and data mining strategies: comprehensive study. *Вычислительные технологии*. 2024. №5. С.113-123.
12. Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. Некоторые вопросы использования цифровых двойников при создании информационных систем. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2022. №2. С. 22-29.
13. Chernyi S.G., Ivanovskii A.N. automated system for ship draught measurement with component of intelligent systems. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2022. №2. С.59-69.
14. Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Петряшов И.С., Степанов А.С. Цифровой реинжиниринг позаказного производства оборудования на малых предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024. №8(773). С. 52-60.
15. Зайцева Ю.С. Методы искусственного интеллекта для задач управления робототехническими и мехатронными системами: обзор. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024. №1(776). С. 41-56.
16. Сухомлинов А.И. Интегрированная система управления производством промышленного предприятия. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2024. №3. С. 98-109.
17. Долгов В.А., Никищечкин П.А., Ивашин С.С., Долгов Н.В., Акимов А.А. Современные подходы к построению цифровых двойников продуктов, процессов и систем, включая производственно-логистические системы машиностроительных предприятий. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2023 №2. С. 88-96.
18. Ковалёв С.П. Применение цифровых двойников в автоматизированном управлении высокотехнологичным промышленным производством. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2024. №4. С. 211-220.
19. Ebraheem A., Ivanov I. Towards automated and optimal IIoT design. *Информатика и автоматизация*. 2024. №2. С.377-406.
20. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Модель информационного взаимодействия элементов многоуровневой системы цифровых двойников. *Информатика и автоматизация*. 2021. №3. С.530-561.

References

1. Antsyferov S.S. et al. System for Monitoring and Forecasting Equipment Behavior Based on IIoT // Automation in Industry. 2024. No. 3. — P. 51–55.
2. Antsyferov S.S., Sigov A.S., Fazilova K.N. Methodology for Monitoring the Functioning of Non-Equilibrium Stable Technical Systems // Problems of Artificial Intelligence. 2021. No. 1 (20). P. 18–26.
3. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Methodology for Quality Control of Technological Processes in Intelligent Manufacturing // High-Tech Technologies. 2023. Vol. 24. No. 7. P. 39–43.

4. Antsyferov S.S., Tikhonov I.A. Intellectualization of Electronics Industry Enterprises and Risk Management // Problems of Artificial Intelligence. 2023. No. 4 (31). P. 29–39.
5. Antsyferov S.S., Fazilova K.N., Rusanov K.E. Intelligent Systems for Managing Technological Processes // Problems of Artificial Intelligence. 2024. No. 2 (43). P. 37–44.
6. Solod V.S. Fiziko-matematicheskaya model' dlya razrabotki ekspertnoj sistemy sortoprokatnogo proizvodstva // Problemy iskusstvennogo intellekta. 2024. №3 (34). S. 20-38.
7. Rylov S.A. Odnoparnyj Ethernet T1S kak osnova intellektual'nyh datchikov promyshlennogo interneta veshchej // Problemy iskusstvennogo intellekta. 2024. №4 (35). S. 222-232.
8. Fam K.B., Murashev P.M., Bogatkov V.N. Nechetkaya model' diagnostiki tekhnologicheskikh processov // Problemy iskusstvennogo intellekta. 2023. №3 (30). S. 76-86.
9. Bahtadze N.N., Kon'kov A.E., Elpashev D.V., Kushnarev V.N., Muhtarov K.S., Purtov A.V., Pyatekij V.E., Cheresheko A.A. Metody sinteza cifrovyyh dvoynikov na osnove cifrovyyh identifikatsionnykh modelej proizvodstvennykh processov // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2024. №4. S. 100-111.
10. Aristova N.I. Issledovanie kompensatsii braka pri izgotovlenii partii uzlov na gibkikh proizvodstvakh // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2023. №1. S. 82-86.
11. Sahib R.H., Jawad D.H.M., Mtasher A.K., Msad J.J. Network intrusion detection system using machinelearning models and data mining strategies: comprehensive study // Vychislitel'nye tekhnologii. 2024. №5. S.113-123.
12. Zaccarinnyj A.A., Ionenkov Yu.S. Nekotorye voprosy ispol'zovaniya cifrovyyh dvoynikov pri sozdani informatsionnykh sistem // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2022. №2. S. 22-29.
13. Chernyi S.G., Ivanovskii A.N. automated system for ship draught measurement with component of intelligent systems // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. 2022. №2. S.59-69.
14. Bulavin V.F., Bulavina T.G., Petryashov I.S., Stepanov A.S. Cifrovoy reinzhiniring pozakaznogo proizvodstva oborudovaniya na malyykh predpriyatiyakh // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye. 2024. №8(773). S. 52-60.
15. Zajceva Yu.S. Metody iskusstvennogo intellekta dlya zadach upravleniya robototekhnicheskimi i mekhatronnymi sistemami: obzor // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye. 2024. №1(776). S. 41-56.
16. Suhomlinov A.I. Integrirovannaya sistema upravleniya proizvodstvom promyshlennogo predpriyatiya // Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii. 2024. №3. S. 98-109.
17. Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Dolgov N.V., Akimov A.A. Sovremennyye podhody k postroyeniyu cifrovyyh dvoynikov produktov, processov i sistem, vkluchaya proizvodstvenno-logisticheskie sistemy mashinostroyitel'nykh predpriyatij // Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii. 2023. №2. S. 88-96.
18. Kovalyov S.P. Primeneniye cifrovyyh dvoynikov v avtomatizirovannom upravlenii vysokotekhnologichnym promyshlennym proizvodstvom // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. 2024. №4. S. 211-220.
19. Ebraheem A., Ivanov I. Towards automated and optimal IIoT design // Informatika i avtomatizatsiya. 2024. №2. S. 377-406.
20. Vorob'ev A.V., Vorob'eva G.R. Model' informatsionnogo vzaimodeystviya elementov mnogourovnevnoy sistemy cifrovyyh dvoynikov // Informatika i avtomatizatsiya. 2021. №3. S.530-561.

RESUME

S. S. Antsyferov, K.N. Fazilova, D.S. Muravyov

Intelligent Quality Control Systems for High-Tech Manufacturing Processes and Equipment

The task of achieving a high level of quality in the functioning of technological processes (TP) and technological equipment in intelligent high-tech production (IHTP) can be addressed through continuous monitoring and forecasting of their states, as well as timely execution of production and preventive maintenance.

In this context, the development of a methodology and systems for quality management of technological processes and equipment becomes highly relevant. These systems should provide information not only about the actual state of the monitored processes and equipment but also offer predictions about the potential emergence of critical states.

The goal of this work is to develop a methodology for quality management of technological processes and equipment in intelligent high-tech production.

The methodology is based on Industry 4.0, which involves the use of elements of artificial intelligence, machine learning methods, digital twins, industrial Internet of Things technology, knowledge bases, and databases.

The practical implementation of the quality management system as a trainable neural network will enable the creation of a calculation matrix, allowing for the comparison of the current situation with pre-calculated scenarios from the tree of all quality states.

The proposed methodology facilitates the development of quality management systems for technological processes and equipment in intelligent high-tech production in the form of programmable modules. These modules enable the optimization of preventive maintenance plans based on machine learning.

РЕЗЮМЕ

С.С. Анцыферов, К.Н. Фазилова, Д.С. Муравьев

Интеллектуальные системы управления качеством технологических процессов и оборудования наукоёмкого производства

Задача достижения высокого уровня качества функционирования технологических процессов (ТП) и технологического оборудования интеллектуального наукоёмкого производства (ИНП) может быть решена путем непрерывного мониторинга и прогнозирования их состояний, а также своевременным проведением производственно-профилактических работ.

В связи с этим актуальной становится проблема разработки методологии и реализующих ее систем управления качеством технологических процессов и технологического оборудования. Данные системы должны предоставлять информацию не только о реальном состоянии контролируемых процессов и оборудования, но и давать прогноз о возможности появления критических состояний.

Цель работы – разработка методологии управления качеством технологических процессов и оборудования интеллектуального наукоёмкого производства.

В основу построения методологии положена Индустрия 4.0., предполагающая использование элементов искусственного интеллекта, методов машинного обучения, цифровых двойников, технологии промышленного интернета вещей, базы знаний и базы данных.

Практическая реализация системы управления качеством в виде обучаемой нейросети позволит создать расчетную матрицу, с помощью которой появится возможность сопоставления текущей ситуации с ранее просчитанными вариантами из дерева всех состояний качества.

Предлагаемая методология позволяет создавать системы управления качеством технологических процессов и оборудования интеллектуального наукоёмкого производства в виде программируемых модулей, создающих возможность оптимизации плана предупредительных ремонтно-профилактических работ на основе машинного обучения.

Анцыферов Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва. *Область научных интересов:* системы искусственного интеллекта, эл. почта antsyferov@mirea.ru, адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, телефон +7499 600-80-80, доб. 23043

Фазилова Ксения Наильевна – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва. *Область научных интересов:* системы искусственного интеллекта, эл. почта fazilova@mirea.ru, адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, телефон +7499 600-80-80, доб. 25092

Муравьев Дмитрий Сергеевич – ассистент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва. *Область научных интересов:* системы искусственного интеллекта, эл. почта muravev@mirea.ru, адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, телефон +7499 600-80-80, доб. 25092

Статья поступила в редакцию 16.05.2025