

Петербургский экономический журнал. 2025. № 1. С. 42–53

St Petersburg Economic Journal. 2025, no. 1, pp. 42–53

Научная статья

УДК 62-192:658.511

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАК ФАКТОР ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

RELIABILITY OF ENGINEERING EQUIPMENT AS THE MANUFACTURING PROCESS EFFICIENCY FACTOR

А. В. Корниенко

инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, kornienkoav1997@mail.ru

A. V. Kornienko

Engineer of Modeling of Technological Processes and Design of Power Equipment Laboratory, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, kornienkoav1997@mail.ru

Е. Р. Мартынец

ведущий специалист отдела технологического и промышленного форсайта Передовой инженерной школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого «Цифровой инжиниринг», Санкт-Петербург, Российская Федерация, katya_martynets@inbox.ru

E. R. Martynets

Leading Specialist of Technological and Industrial Foresight Department, SPbPU School of Advanced Engineering Studies in Digital Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, katya_martynets@inbox.ru

В. А. Левенцов

к.э.н., доцент, директор Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, vlevantsov@spbstu.ru

V. A. Leventsov

PhD (Economics), Associate Professor, Director of the SPbPU Institute of Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, vlevantsov@spbstu.ru

Аннотация. Макроэкономические и геополитические изменения требуют трансформации производственных систем. Производственный процесс на предприятии, ключевым элементом которого является технологическое оборудование, должен протекать в соответствии с принципами рациональности, оптимальности и высокого уровня стабильности. В связи с этим, а также по причине ряда недостатков классических подходов к анализу надежности оборудования авторами предложен усовершенствованный подход к определению вероятности отказа оборудования и безотказной работы, основанный на применении технологии цифровых двойников и проведении цифровых испытаний работы оборудования. Классический подход, основанный на сборе и обработке статистических данных, уступает современным методам моделирования технологических процессов по причине разрозненности данных, высоких требований к организации процессов сбора и обработки данных, дорогостоящих испытаний и влияния человеческого фактора. Технология цифровых двойников, в свою очередь, обеспечивает сбор необходимых данных в режиме реального времени с учетом критических зон оборудования, моделирование процессов его эксплуатации, высокоэффективное планирование

© Корниенко А. В., Мартынец Е. Р., Левенцов В. А., 2024

технического обслуживания и ремонта оборудования, а также прогнозирование возможного выхода его из строя или наступление аварийных ситуаций. В связи с этим возможно повышение качества производственного процесса за счет обеспечения контроля надежности технологического оборудования, а также выполнение производственной программы в соответствии с политиками формирования технологического суверенитета и национальной безопасности.

Ключевые слова: технология цифровых двойников, производственный процесс, технологическое оборудование, надежность, отказ, организация производства, машиностроение, технологический суверенитет

Abstract. Macroeconomic and geopolitical changes require the transformation of production systems. Enterprise production process, the key element of which is engineering equipment, should proceed in accordance with the principles of rationality, optimality and a high level of stability. In this regard, as well as due to a number of disadvantages of classical approaches to the analysis of equipment reliability, the authors propose an improved approach to determining the probability of equipment failure and uptime, based on the use of digital twins technology and conducting digital tests of equipment operation. The classical approach based on the collection and processing of statistical data is inferior to modern methods of technological processes modeling due to the fragmentation of data, high requirements for the organization of data collection and processing, expensive tests and the influence of the human factor. Digital twin technology, in turn, provides the collection of necessary data in real time, taking into account critical areas of equipment, modeling of equipment operation processes, highly efficient planning of maintenance and repair of equipment, as well as forecasting the possible failure of equipment or the occurrence of emergency situations. In this regard, it is possible to improve the quality of the manufacturing process by ensuring the reliability of technological equipment, as well as the implementation of production programs in accordance with the policies of formation of technological sovereignty and national security.

Keywords: digital twin technology, production process, technological equipment, reliability, failure, production organization, mechanical engineering, technological sovereignty

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение, цель

В условиях геополитических изменений, формирующихся политических, экономических и технологических вызовов, трансформации логистического взаимодействия и масштабирования передовых цифровых технологий в рамках деятельности промышленных предприятий требуются новые подходы к производству высокотехнологичной продукции. В настоящий момент с целью обеспечения национальной безопасности и глобальной конкурентоспособности российской экономики рядом нормативно-правовых документов на государственном уровне введены показатели по уровню внедрения цифровых технологий на предприятиях, определены направления развития в части формирования импортозамещающего и импортоопережающего уклада, достижения технологического суверенитета

и импортонезависимости. Среди инициатив стратегического развития государства особо следует выделить национальный проект по развитию станкостроения, планируемый в рамках реализации и расширения стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года [1–4].

Высокий уровень актуальности и значимости протекающей цифровой трансформации промышленности подразумевает повсеместную автоматизацию и совершенствование производственных процессов. В рамках цифровой трансформации происходят масштабные изменения функционирования как отдельных компаний, так и целых отраслей экономики, которые основаны на масштабном внедрении передовых цифровых и производственных технологий в существующие бизнес-процессы и бизнес-модели предприятия. В связи с этим

формируется потребность в совершенствовании управляющих процессов промышленных предприятий, которые позволят учесть все организационные изменения, связанные с реализацией этапов цифровой трансформации промышленности и влиянием макро- и микроэкономических факторов.

Управление технологическим процессом, составляющим основу производственного процесса, путем анализа и регулирования его точности (т. е. степени соответствия результатов установленным требованиям) и стабильности/устойчивости (т. е. свойства сохранять точность показателей качества при протекании процесса) – это процесс, направленный на обеспечение качества производственного цикла. Потенциальное качество, заложенное при проектировании производимой продукции, должно гарантированно обеспечиваться на стадии производства.

При этом в качестве основного ресурса производственного процесса можно выделить технологическое оборудование. Оборудование является комплексной системой узлов и агрегатов, которые имеют свойство изнашиваться, в связи с чем необходимо отслеживать уровень надежности как системы в целом, так и ее отдельных элементов. Отсутствие контроля за состоянием оборудования приводит к возникновению новых, «тонких» эффектов и изменению физических процессов, протекающих при эксплуатации оборудования, в связи с чем необходимо совершенствовать методы и подходы к оценке и обеспечению его надежности. Без надежного технологического оборудования и достаточной технологической оснащенности невозможно производить конкурентоспособную продукцию, особенно в условиях формирования технологического суверенитета.

Как указано в национальном стандарте ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» [5], наработка оборудования до первого отказа, его наработка между отказами, ресурс оборудования могут быть определены лишь после того, как наступил отказ или было достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили, можно говорить лишь о

прогнозировании этих величин с большей или меньшей степенью достоверности. Ситуация осложнена тем, что безотказная наработка, ресурс, срок службы и срок сохраняемости зависят от большого количества факторов, часть которых не может быть проконтролирована, а другие заданы с той или иной степенью неопределенности.

Таким образом, на стабильность, надежность и устойчивость функционирования технологического оборудования напрямую влияет вероятность наступления отказа оборудования и выхода его из строя. Вследствие этого рекомендуется применять технологии компьютерного моделирования, проводить цифровые испытания эксплуатации технологического оборудования и использовать технологию его цифрового двойника. Это позволит предсказывать вероятность наступления отказа оборудования, тем самым повысится уровень его надежности и обеспечится бесперебойность и качество производственного процесса. Применение методов компьютерного моделирования будет способствовать отслеживанию всех изменений, вносимых в конструкцию оборудования или происходящих вследствие его эксплуатации, и мониторингу изменений, связанных с проведением ремонтных и обслуживающих работ.

Кроме того, выход оборудования из строя (отказ) может означать недостаточный уровень его надежности, заложенный на этапе формирования производственной системы. В связи с этим следует обеспечить комплексный подход к управлению надежностью, позволяющий выявить возможные причины возникновения отказов оборудования, и заранее обеспечить наибольший уровень его надежности, тем самым увеличить период безотказности системы и повысить вероятность изготовления продукции в установленный срок и с заданными характеристиками.

Гипотеза исследования заключается в том, что применение технологии цифрового двойника может повысить эффективность разработки изделия, отдалить момент наступления отказа оборудования, увеличив его ресурс и, соответственно, надежность всей производственной системы.

Технологическая оснащенность производства, нормирование показателей надежности и оценка достаточности того или иного уровня надежности технических объектов оказываются непосредственно связанными с проблемой обеспечения качества [6; 7]. Надежность определяется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [8; 9]. Надежность является комплексным показателем, который в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств.

Источниками информации о надежности систем являются расчеты при их проектировании, различные виды стендовых и полигонных испытаний, статистические данные предприятий об отказах конструктивных элементов, характере и причинах их возникновения, наработках до предельного состояния и других показателях эксплуатационной надежности. На начальной стадии создания системы основным источником сведений об уровне ожидаемой надежности являются результаты конструкторских расчетов и статистические данные о его аналогах.

Комплексное управление надежностью поможет выявить, а затем и устранить причины нарушения работоспособного состояния оборудования, а также обнаружить отказ прежде, чем он приведет к поломке или аварии, и заранее обеспечить наибольший уровень надежности оборудования, тем самым увеличив период безотказной работы системы.

В число методов, которые используются при решении задач обслуживания оборудования, входит анализ видов, последствий и критичности отказов (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA) [10]. Целью внедрения FMECA является постоянное совершенствование продуктов, процессов, надежности, безопасности и сокращение гарантийных обязательств. FMECA наряду с другими инструментами обеспечения качества способствует

предотвращению проблем и непрерывному совершенствованию, которые являются ключевыми элементами всеобщего управления качеством (Total Quality Management – TQM). В последнее время все больше отраслей промышленности используют процедуру FMECA для повышения эффективности процессов проектирования, производства и технического обслуживания. Однако данный метод позволяет судить о надежности системы на основании уже накопленной информации об отказах, другими словами, FMECA следует применять совместно с превентивными инструментами, позволяющими прогнозировать наступление отказа.

При этом в современной литературе по организации производства только начинают появляться исследования, связанные с комплексным изучением процессов внедрения цифрового двойника на этапах производства изделий, в малой степени освещены вопросы применения компьютерных методов для производственных процессов и отсутствуют современные методы и подходы к обеспечению надежности технологического оборудования с применением технологии цифровых двойников.

В связи с этим актуальными становятся научно обоснованные методологические и организационно-управленческие подходы к эффективному осуществлению производственной деятельности за счет применения передовых цифровых технологий: необходимо совершенствование методов и подходов, применяемых промышленными предприятиями в целях повышения операционной эффективности деятельности, учета всех стратегических и организационных изменений рынка, проведения цифровой трансформации промышленности и др.

Использование цифровых двойников способствует улучшению качества процессов производства, увеличению эффективности проводимых цифровых (виртуальных) испытаний [11–15; 19]. Цифровой двойник выступает инструментом для формирования единой информационной системы между всеми элементами предприятия, моделирования поведения оборудования, проектирования и налаживания производственной системы и др. Цифровой двойник оборудования позволит оценить его состояние и вовремя отреагировать на по-

тенциальное изменение в поведении оборудования, другими словами, цифровой двойник позволит избежать наступления критической поломки оборудования и выхода его из строя.

Научной проблемой, на решение которой направлено настоящее исследование, выступает создание необходимых организационно-технических условий в рамках деятельности организаций по достижению технологического суверенитета для совершенствования процессов производственной системы с учетом внедрения технологии цифровых двойников.

Цель исследования – совершенствование классического подхода к определению надежности оборудования за счет внедрения технологии цифровых двойников в системы мониторинга состояния оборудования высокотехнологичных производств. Задачи исследования включали анализ классического подхода к определению надежности оборудования, выявление потенциальных возможностей внедрения технологии цифровых двойников в систему мониторинга состояния оборудования, разработку модели определения его надежности с учетом применения цифровых двойников.

Методы исследования

Достижение вышеуказанных задач и разработка предлагаемого научного подхода возможны за счет применения следующих методов исследования:

- проблемно-аналитические методы для определения объекта, предмета, формирования понятийного аппарата и др.;
- методы системного анализа и структурирования;
- методы сравнения и аналогии;
- индуктивно-дедуктивный метод;
- методы оптимизации;
- методы визуализации результатов;
- другие общенаучные методы.

Теоретико-методологическая основа исследования базируется на следующих материалах:

1. Система стандартов «Надежность в технике», национальный стандарт ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» и другие нормативно-технические документы.

2. Публикации и результаты международных и отечественных научных, аналитических и прикладных исследований, посвященные в частности:

- вопросам организации производственных систем на разных стадиях жизненного цикла;
- концептуальным положениям теории, проблемам и принципам повышения устойчивости и надежности технических систем и технологического оборудования;
- практикоориентированным подходам к разработке и применению цифровых двойников и др.

В ходе исследования был проведен обзор научных работ, анализ мнений отраслевых экспертов, полученных при опросе представителей высокотехнологичной промышленности, а также анализ бенчмарков и лучших практик организации систем управления производством. На основе изученных материалов, а также авторского анализа предложена новая, усовершенствованная модель определения надежности оборудования. В рамках данной статьи кратко представлены результаты проведенного исследования.

Результаты и дискуссия

Среди факторов качества производственных процессов в рамках исследования наибольшее значение следует присвоить технологическому оборудованию по ряду причин:

- увеличение тенденций, связанных с роботизацией и повышением автономности производственных линий и заводов в целом (в том числе снижение количества персонала и взаимозависимое повышение количества оборудования);
- производство очевидно направлено на реализацию процесса изготовления, в связи с этим оборудование – важный производственный фактор;
- высокая стоимость простоев (согласно статистике, для крупных предприятий стоимость простоя в 2022 г. составляла от 200 000 до 775 000 рублей в минуту [16]);
- работоспособность оборудования, которая определяет эффективность и производительность других факторов и процессов производства, включая работу персонала с оборудованием в процессе производства,

требуемые навыки, применяемые для производства и работы оборудования ресурсы и технологии, а также необходимость формирования организационной, производственной и экономической системы предприятия и др.

Таким образом, первичная потребность производства заключается в стабильной работе оборудования. Как уже было рассмотрено, традиционно к определению надежности подходят с точки зрения статистического анализа: предприятие накапливает информацию о работе оборудования, отказах, изменениях в конструкции и системах, изменениях состояния, проводимых ремонтах и процедурах технического обслуживания и др. Так, под отказом (Failure) понимают событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (согласно ГОСТ Р 27.102–2021) [5]. В свою очередь, обратный показатель отказам – это безотказность, т. е. свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

На основе данных об отказах, полученных из опыта или эксплуатации, вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется статистической оценкой по следующей формуле [7]:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1)$$

где N_0 – общее число однотипных объектов (элементов), поставленных на испытания (находящихся под контролем); при этом важно, что во время испытаний отказавший объект не восстанавливается и не заменяется исправным; $n(t)$ – число отказавших объектов за время t .

Статистическая оценка вероятности отказа $Q(t)$ определяется в свою очередь обратной формулой:

$$Q(t) = 1 - \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (2)$$

Отсутствие полных сведений о процессах и объектах в окружающей среде определяет вероятностный характер отказов, т. е. отказ – явление детерминированное, но происходит он в случайный момент времени. Поэтому основным математическим аппаратом теории надежности является теория вероятностей и математическая статистика.

Классический (традиционный) подход к определению надежности можно представить как оценку вероятности наступления отказа $Q_0(t)$ оборудования и вероятности его безотказной работы $P_0(t)$ (рис. 1).

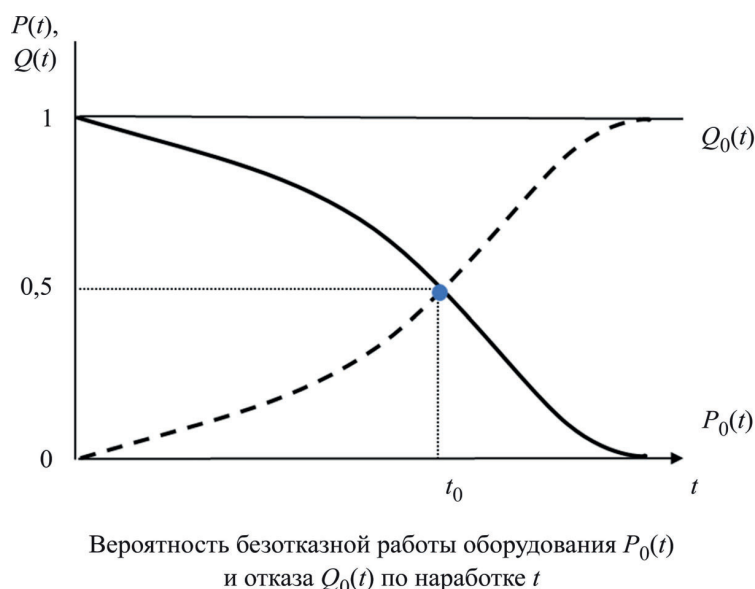


Рис. 1. Классический подход к определению вероятности безотказной работы и отказа оборудования

Fig. 1. A classic approach to determining the probability of uptime and equipment failure

Источник: по материалам [7].

Source: based on [7].

Представленный классический подход имеет ряд некоторых ограничений, значимость которых усиливается для высокотехнологичных и наукоемких предприятий. Среди ограничений представленной теории можно выделить, в частности, следующие:

1. Накопленная статистика отказов оборудования, как правило, не учитывает особенностей технологических процессов при эксплуатации оборудования и не имеет отраслевой специфики.

2. Накопленная статистика состоит, как правило, из неполных, разрозненных данных, что объясняется отсутствием данных от производителя, а также необходимостью анализа длительного периода работы оборудования, иногда десятков лет.

3. На предприятии может быть неэффективно организована или в критичном случае может отсутствовать служба главного механика, в задачи которой входит в том числе сбор (генерация), обработка и анализ статистических данных об отказах оборудования.

4. Генерация данных по статистике отказов оборудования имеет ограничения, связанные с необходимостью проведения его испытаний в разных режимах эксплуатации, что не является целесообразным в условиях полной загрузки предприятия.

5. Обработка статистических данных может приводить к ошибкам или неточностям, вызванным человеческим фактором и особенностями компетенций персонала.

6. Проведение испытаний оборудования вне плановой работы предприятия является дорогостоящим процессом, требующим привлечения дополнительного персонала и ресурсов.

7. Проведение испытаний и генерация данных об отказах оборудования – длительный процесс, в связи с чем сбор статистических данных проводится, как правило, для находящихся в эксплуатации объектов. Для новых типов оборудования данные об отказах отсутствуют или декларируются производителем, что в некоторых случаях не соответствует объективной реальности.

8. Накопленная статистика отказов не учитывает моральный и физический износ оборудования, проведенные ремонты и техническое

обслуживание, в том числе замену деталей или внесение других изменений в подсистемы оборудования.

Для обеспечения высоких показателей надежности и безопасности требуется проведение тщательного «надежностного» анализа систем с учетом характеристик контроля, одной из важнейших таких характеристик является полнота контроля [17]. Таким образом, принципиально важным является внедрение технологий и инструментов, которые будут способствовать повышению эффективности работы оборудования. К числу таких инструментов относится технология разработки цифровых двойников, при этом цифровые (виртуальные) испытания выступают неотъемлемой частью технологии цифровых двойников [18]. Благодаря проведению испытаний в цифровом пространстве инженеры-технологи, операторы оборудования и другой инженерно-технический персонал могут многократно проводить проверки и заранее просчитывать поведение машины, возникновение возможных отказов, моделируя с минимальными финансовыми затратами различные условия эксплуатации, в том числе более сложные, чем в жизни, процессы. Цифровые (виртуальные) испытания проводятся для каждого типа оборудования, а цифровые (виртуальные) стенды и полигоны, в свою очередь, позволяют провести испытания во всех возможных для моделирования условиях, например, для определения вибрационных, аэродинамических, прочностных и прочих характеристик.

Так, внедрение технологии цифровых двойников в систему мониторинга за состоянием оборудования позволит увеличить длительность периода между отказами оборудования, что наглядно продемонстрировано на модели определения отказов оборудования и безотказной работы с учетом применения передовых цифровых и производственных технологий, что составляет основу предлагаемого усовершенствованного подхода и подтверждает эффективность технологии цифровых двойников в промышленности (рис. 2).

На представленной модели количество отказов оборудования $n(t) \rightarrow \min$ за период времени, равный t . При этом $t \rightarrow \max$ при стабильном (не увеличивающемся) количе-

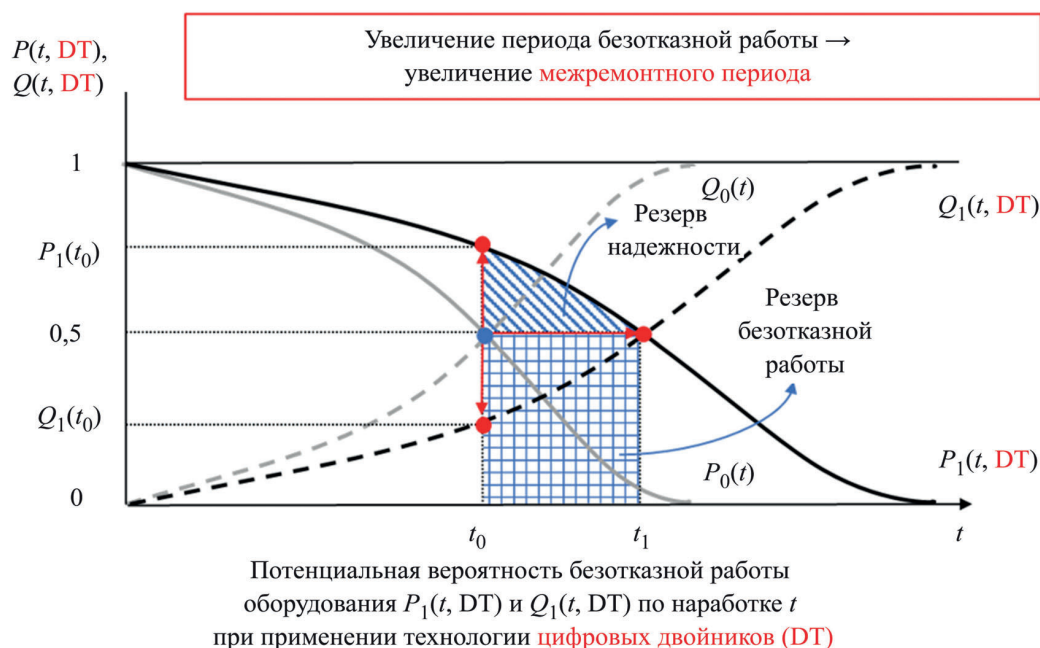


Рис. 2. Модель усовершенствованного подхода к определению вероятности безотказной работы и отказа оборудования с применением технологии цифровых двойников

Fig. 2. A model of an improved approach to determining the probability of uptime and equipment failure using digital twin technology

Источник: составлено авторами.

Source: made by the authors.

стве отказов оборудования $n(t)$. Длительность межремонтного периода t_0 увеличивается до значения t_1 , если:

1) количество отказов $n(t)$ за период t снижается или остается таким же;

2) проводится моделирование работы оборудования, за счет чего прогнозируется выход оборудования из строя или нарушение нормальных режимов работы;

3) в процессе анализа производительности оборудования учитываются все изменения, проходящие с оборудованием, включая установку новых деталей и других элементов, длительность простоев, остановки и т. д.;

4) определены критические зоны, в которых критически важно отслеживать состояние оборудования, т. е. зоны, в которых нарушение нормальных режимов работы оборудования вызывает «тонкие» эффекты и приводит к опасным аварийным ситуациям или остановам;

5) отслеживается состояние оборудования в режиме реального времени, вовремя возникают предупреждающие сигналы и оповещения о некорректной работе оборудования,

нарушениях нормальных режимов работы, потенциальных аварийных ситуациях.

Если отказ оборудования происходит в период t_1 , можно свидетельствовать об увеличении вероятности безотказной работы, т. е. $P_1(t_0) > P_0(t_0)$, $P_0(t_0) = 0,5$. Таким образом формируется резерв надежности, когда вероятность безотказной работы оборудования в момент времени периода $(t_0; t_1)$ оценивается выше 50 % ($P_1(t_0) > 0,5$). Вероятность наступления отказа, наоборот, уменьшается, т. е. $Q_1(t_0) < Q_0(t_0)$, $Q_0(t_0) = P_0(t_0) = 0,5$. Аналогично возникает резерв безотказной работы, когда вероятность выхода оборудования из строя составляет меньше 50 % ($Q_1(t_0) < 0,5$) на протяжении периода t_1 , который дольше, чем t_0 .

Перечисленное способствует увеличению длительности безотказной работы оборудования, поскольку наступление события, из-за которого оборудование выйдет из строя и потребует ремонт или техническое обслуживание, переносится на более поздний период.

Таким образом, усовершенствованная модель определения вероятности отказа и

безотказной работы учитывает внедрение передовых цифровых и производственных технологий, применение цифровых двойников для проведения высокоэффективного анализа надежности оборудования и повышения эффективности производственной системы, что напрямую способствует увеличению качества производственных процессов. Уменьшение количества отказов оборудования за конкретный период времени напрямую влияет на повышение длительности межремонтного цикла и тем самым обеспечивает надежность оборудования и всей производственной системы.

Заключение

Повышение эффективности производственных процессов, по мнению отраслевых экспертов, возможно для любых типов предприятия любого уровня технологичности (с точки зрения вида оборудования и даты ввода оборудования в эксплуатацию), поскольку современные аппаратные и программные решения позволяют объединять элементы производственной системы, в том числе оборудование, в единое цифровое пространство. Учитывая средний «возраст» отечественных высокотехнологичных предприятий, а также стоящие перед ними задачи и потребность в короткий срок развернуть, наладить и развить производство критически важной продукции, принципиальным является получение и анализ достоверной актуальной информации о состоянии производства для предприятий, не оснащенных современным высокотехнологичным оборудованием.

Поставленная в исследовании цель, направленная на совершенствование подходов к определению надежности оборудования, достигнута. В статье представлена усовершенствованная модель определения надежности с учетом применения технологии разработки цифровых двойников. Внедрение разработанных методологий в деятельность предприятий промышленности будет способствовать обеспечению высокого уровня цифровой трансформации целых отраслей, что является существенным для предприятий общего машиностроения. Наибольшая

эффективность разрабатываемых методов возможна в регионах, имеющих системообразующие предприятия промышленности. Это позволит повысить уровень качества производственных процессов, снизить сроки и стоимость вывода продукции на рынок за счет внедрения технологии цифровых двойников на этапы разработки и производства изделий, повысить эффективность технического обслуживания и ремонта.

Результативность и получение экономических и технологических эффектов от организации системы контроля за надежностью оборудования в полной мере зависит от корректности этапов по совершенствованию производственной системы: первоначально необходимо обозначить задачи проекта, наладить систему контроля за некоторой частью оборудования, определить имеющиеся критические зоны и затем перейти к полномасштабному развертыванию системы контроля. Детальное описание этапов совершенствования производственной системы в рамках повышения надежности оборудования, а также аспекты развития терминологии с учетом внедрения передовых цифровых и производственных технологий в рамках концепции организации производства будут представлены в следующих работах и исследованиях.

Совокупность полученных результатов позволит сформировать научно-технический задел для развития теоретических и практических механизмов обеспечения надежности производственных процессов и технологической инфраструктуры предприятий, совершенствования подходов к организации технического обслуживания на производстве, перехода на современный этап в обеспечении производительности технологического оборудования за счет применения цифровых инструментов. Достижение планируемых результатов исследования обеспечит повышение качества процессов отечественных предприятий машиностроения, что напрямую направлено на реализацию программ технологического развития Российской Федерации и формирование технологической самостоятельности государства, импортозамещение и обеспечение национальной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 ноября 2020 г. № 2869-р «Стратегия развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года». URL: <http://static.government.ru/media/files/NyeLKqLhrJrydnGRBm39nHl0hJNOzHzQ.pdf> (дата обращения: 09.07.2024).
2. Правительство планирует расширить программу развития станкоинструментальной промышленности и робототехники до национального проекта | Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. URL: <https://ac.gov.ru/news/page/pravitelstvo-planiruet-rassirit-programmu-razvitia-stankoinstrumentalnoj-promyslennosti-i-robototekhniki-do-nacionalnogo-proekta-27821> (дата обращения: 09.07.2024).
3. На национальный проект по робототехнике и станкостроению дают 300 млрд рублей – Ведомости. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2024/06/11/1043378-natsproekt-robototekhnike-300> (дата обращения: 09.07.2024).
4. Российская газета. Россия активизирует создание собственных станков и оборудования. Торгово-промышленная палата Российской Федерации. URL: <https://news.tpprf.ru/ru/media/5827932/> (дата обращения: 09.07.2024).
5. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75917/> (дата обращения: 10.07.2024).
6. Системный анализ, управление и обработка информации / В. М. Еськов, А. А. Хадарцев, М. А. Филатов и др. Тула: ТулГУ, 2015. Ч. XII. 232 с.
7. Systems Reliability: Statistical Analysis And Applications / L. Papic, Yu. Klochkov, J. Aronov, A. Gazizulina. Prijevor – Sacak: DQM Research Center, 2022. 174 с.
8. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11290> (дата обращения: 10.07.2024).
9. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62713/> (дата обращения: 03.07.2024).
10. Папич Л. Интегрирование проектирования и обслуживания техники с использованием нового подхода в инженерных основах жизненного цикла // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2004. № 3. С. 6–10.
11. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 01.07.2024).
12. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина и др. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.
13. Корниенко А. В., Мартынец Е. Р., Левенцов В. А. Совершенствование наукоемкого производства с использованием системы комплексных технологических решений // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сб. тез. докл. Национ. науч.-практ. конф. с междунар. уч., Санкт-Петербург, 27 мая 2022 г. / СПбПУ. Санкт-Петербург, 2022. С. 22–29.
14. Корниенко А. В., Левенцов В. А. Цифровой двойник как инструмент проектирования производства // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем: сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубеж. уч., Санкт-Петербург, 20–21 нояб. 2020 г. / СПбПУ. Санкт-Петербург, 2020. С. 624–628.
15. Мартынец Е. Р., Корниенко А. В., Левенцов В. А. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства // Горизонты экономики. 2022. № 6 (72). С. 68–74.
16. Расчет стоимости простоя | Atlassian. URL: <https://www.atlassian.com/ru/incident-management/kpis/cost-of-downtime> (дата обращения: 01.07.2024).
17. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. 2-е изд., испр. М.: ЛЕНАНД, 2016. 256 с.
18. Мартынец Е. Р., Корниенко А. В., Левенцов В. А. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании наукоемкого производства // Передовые производственные технологии: компьютерные

(суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сб. тез. докл. Национ. науч.-практ. конф. с междунар. уч., Санкт-Петербург, 27 мая 2022 г. / СПбПУ. Санкт-Петербург, 2022. С. 111–119.

19. Гракун А. А. Новые подходы к оценке общей эффективности оборудования // Петерб. экон. журн. 2024. № 3. С. 5–14.

Информация об авторах

Корниенко Александр Владимирович – аспирант, инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б), ORCID: 0000-0002-2172-6295, SPIN-код автора: 4928-9927.

Мартынец Екатерина Романовна – аспирант, ведущий специалист отдела технологического и промышленного форсайта Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» (адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б), ORCID: 0000-0001-8796-0917, SPIN-код автора: 6494-1580.

Левенцов Валерий Александрович – к.э.н., доцент, директор Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б), ORCID: 0000-0002-5282-7208, SPIN-код автора: 9877-2733.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024, принята к публикации после рецензирования 30.11.2024, опубликована онлайн 31.03.2025.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2869-r dated November 5, 2020 «Strategy for the development of the machine tool industry for the period up to 2035». URL: <http://static.government.ru/media/files/NyeLKqLhrJrydnGRBm39nHl0hJNOzHzQ.pdf> (accessed: 09.07.2024). (In Russ.)
2. The Government plans to expand the program for the development of the machine tool industry and robotics to a national project | Analytical Center under the Government of the Russian Federation. URL: <https://ac.gov.ru/news/page/pravitelstvo-planiruet-rassirit-programmu-razvitia-stankoinstrumentalnoj-promyslennosti-i-robototekhniki-donatsionalnogo-proekta-27821> (accessed: 09.07.2024). (In Russ.)
3. 300 billion rubles are given for the national project on robotics and machine tool construction – Vedomosti. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2024/06/11/1043378-natsproekt-robototekhnike-300> (accessed: 09.07.2024). (In Russ.)
4. Russian Paper. Russia is stepping up the creation of its own machines and equipment. Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation. URL: <https://news.tpprf.ru/ru/media/5827932/> (accessed: 09.07.2024). (In Russ.)
5. GOST R 27.102–2021 Reliability in engineering. The reliability of the object. Terms and definitions. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75917/> (accessed: 10.07.2024). (In Russ.)
6. Eskov V. M., Khadartsev A. A., Filatov M. A. et al. System analysis, management and information processing. Pt. XII. Tula, Tula State University, 2015, 232 p.
7. Papic L., Klochkov Yu., Aronov J., Gazizulina A. Systems Reliability: Statistical Analysis And Applications. Prijevor – Cacak, DQM Research Center, 2022, 174 p.
8. GOST 27.002–89. Reliability in engineering. Basic concepts. Terms and definitions. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11290> (accessed: 10.07.2024). (In Russ.)
9. GOST 27.002–2015. Reliability in engineering. Terms and definitions. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62713/> (accessed: 03.07.2024). (In Russ.)
10. Papic L. Integration of engineering design and maintenance with the use of a new approach in the engineering foundations of the life cycle. Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii [Problems of machine building and automation]. 2004, no. 3, pp. 6–10. (In Russ.)

11. GOST R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (accessed: 01.07.2024). (In Russ.)
12. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A., Shcherbina L. A., Martynets E. R. et al. Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoi promyshlennosti [Digital twins in high-tech industry : monograph]. SPb., POLYTECH-PRESS, 2022, 492 p.
13. Kornienko A. V., Martynets E. R., Leventsov V. A. Sovershenstvovanie naukoemkogo proizvodstva s ispol'zovaniem sistemy kompleksnykh tekhnologicheskikh reshenii [Improving high-tech manufacturing using a system of integrated technological solutions]. Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and organization of high-tech industries: Collection of abstracts of the National scientific and practical conference with international participation, St Petersburg, 27 May 2022. SPbPU, St Petersburg, 2022, pp. 22–29.
14. Kornienko A. V., Leventsov V. A. Tsifrovoy dvoynik kak instrument proektirovaniya proizvodstva [Digital twin as a tool for manufacturing design]. Sustainable development of digital economy, industry and innovative systems: proceedings of a scientific and practical conference with foreign participation, St Petersburg, 20–21 November, 2020. SPbPU, St Petersburg, 2020, pp. 624–628
15. Martynets E. R., Kornienko A. V., Leventsov V. A. Sistema kompleksnykh tekhnologicheskikh reshenii s primeneniem tsifrovyykh dvoynikov proizvodstva [The system of complex technological solutions using digital twins of manufacturing]. Horizons of economics. 2022, no. 6 (72), pp. 68–74.
16. Calculation of the cost of downtime | Atlassian. URL: <https://www.atlassian.com/ru/incident-management/kpis/cost-of-downtime> (accessed: 01.07.2024). (In Russ.)
17. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem [Models and methods for calculating the reliability of technical systems]. Ed. 2nd, ispr. M., LENAND, 2016, 256 p. (In Russ.)
18. Martynets E. R., Kornienko A. V., Leventsov V. A. Universal'naya matritsa trebovaniy, tselevykh pokazatelei i resursnykh ogranichenii pri proektirovanii naukoemkogo proizvodstva [Universal matrix of requirements, targets and resource constraints in the design of high-tech manufacturing]. Advanced manufacturing technologies: computer (super-computer) technologies and the organization of high-tech industries: A collection of abstracts of the National Scientific and Practical Conference with international participation, St Petersburg, 27 May, 2022. SPbPU, St Petersburg, 2022, pp. 111–119.
19. Grakun A. A. New approaches to assessing the overall efficiency of equipment. St Petersburg Economic Journal. 2024, no. 3, pp. 5–14.

Information about the authors

Alexandr V. Kornienko, post-graduate student, engineer of Modeling of technological processes and design of power equipment laboratory, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (address: 195251, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya St., 29, lit. B), ORCID: 0000-0002-2172-6295, SPIN-code of author: 4928-9927.

Ekaterina R. Martynets, post-graduate student, leading specialist of Technological and Industrial Foresight Department, SPbPU School of Advanced Engineering Studies in Digital Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (address: 195251, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya St., 29, lit. B), ORCID: 0000-0001-8796-0917, SPIN- code of author: 6494-1580.

Valery A. Leventsov, PhD (Economics), associate professor, director of the SPbPU Institute of Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (address: 195251, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya St., 29, lit. B), ORCID: 0000-0002-5282-7208, SPIN- code of author: 9877-2733.

The article was submitted on 03.09.2024, accepted for publication after reviewing on 30.11.2024, published online on 31.03.2025.