

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО РЕСУРСА

А. В. Иващенко¹, К. К. Машков²

¹Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

²Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹anton.ivashenko@gmail.com, ²k.k.mashkov@samsmu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальная проблема организации технического обслуживания и ремонта современной медицинской техники в условиях низкой доступности комплектующих и запасных частей и ограниченного ресурса. *Материалы и методы.* Впервые предложена модель декомпозированного ресурса и изложен опыт ее использования на практике для организации технического обслуживания и ремонта медицинской техники с учетом современных требований и условий эксплуатации. Модель декомпозированного ресурса основана на иерархическом разбиении единицы медицинского оборудования (устройства) на составляющие по критерию автономности и периодичности обслуживания и ремонта. Автономность означает реализуемость раздельного обслуживания и ремонта комплектующих с учетом требований надежности и безопасности оборудования. Определено требование необходимости и достаточности обслуживания единицы медицинского оборудования в виде требования единства покрытия событиями технического обслуживания и ремонта его комплектующих. *Результаты.* Предложено использовать указанную модель декомпозированного ресурса при решении задачи управления техническим обслуживанием и ремонтом при переходе от планирования по регламенту к планированию по ресурсу. Разработанная модель декомпозированного ресурса была реализована при планировании технического обслуживания и ремонта некоторых видов медицинской техники в клиниках Самарского государственного медицинского университета для случаев невозможности регламентного обеспечения запасными частями и комплектующими. *Выводы.* Предложенная модель декомпозированного ресурса позволяет реализовать адаптивные методы планирования и управления техническим обслуживанием и ремонтом медицинской техники в системах поддержки принятия решений по эксплуатации оборудования с ограниченным ресурсом.

Ключевые слова: медицинская техника, надежность, техническое обслуживание и ремонт, декомпозиция, предиктивное планирование, организационное управление

Для цитирования: Иващенко А. В., Машков К. К. Организация технического обслуживания и ремонта медицинской техники в условиях ограниченного ресурса // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 102–112. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-8

MAINTENANCE AND REPAIR OF MEDICAL EQUIPMENT IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES

A.V. Ivaschenko¹, K.K. Mashkov²

¹Samara State Medical University, Samara, Russia

²Penza State Technological University, Penza, Russia

¹anton.ivashenko@gmail.com, ²k.k.mashkov@samsmu.ru

Abstract. *Background.* The paper discusses the urgent problem of organizing the maintenance and repair of modern medical equipment in conditions of low availability of components and spare parts and limited resource. *Materials and methods.* For the first time, a decomposed resource model is proposed and the experience of its practical use for organizing the maintenance and repair of medical equipment is presented, taking into account modern requirements and operating conditions. The decomposed resource model is based on the hierarchical decomposition of a unit of medical equipment (device) into components according to the criterion of autonomy and frequency of maintenance and repair. Autonomy means the feasibility of separate maintenance and repair of components taking into account the requirements of reliability and safety of the equipment. The requirement of necessity and sufficiency of maintenance of a unit of medical equipment is determined in the form of the requirement of unity of coverage of events of maintenance and repair of its components. *Results.* It is proposed to use the proposed decomposed resource model in solving the problem of managing maintenance and repair during the transition from planning according to regulations to planning by resource. The developed model of the decomposed resource was implemented in planning the maintenance and repair of some types of medical equipment in the clinics of the Samara State Medical University for cases where scheduled provision of spare parts and components is impossible. *Conclusions.* The proposed model of the decomposed resource allows implementing adaptive methods for planning and managing the maintenance and repair of medical equipment in decision support systems for the operation of equipment with a limited resource.

Keywords: medical technics, reliability, maintenance and repair, decomposition, predictive planning, organizational management

For citation: Ivaschenko A.V., Mashkov K.K. Maintenance and repair of medical equipment in conditions of limited resources. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(3):102–112. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-8

Введение

Организация технического обслуживания и ремонта (ТОиР) современной медицинской техники играет важную роль в обеспечении высокотехнологичной медицины в лечебных и профилактических учреждениях системы здравоохранения. Вместе с тем в связи со сложившимися экономическими и политическими обстоятельствами выполнение регламентных требований по обслуживанию и ремонту сложной медицинской техники иностранного производства затруднено либо невозможно. Решение данной проблемы видится в активном применении современных систем обработки информации и управления, электронных журналов регламентных работ, систем прогнозирования и предиктивной аналитики, в том числе с использованием искусственного интеллекта для уточнения ресурса, параметров надежности и безопасности оборудования и продления сроков службы в существующих условиях. В данной работе предложена модель декомпозированного ресурса и изложен опыт ее использования на практике для организации ТОиР медицинской техники с учетом современных требований и условий эксплуатации.

Материалы и методы

Согласно ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» техническое обслуживание и ремонт сложной техники представляют собой в общем случае комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности объекта при использовании по назначению, ожидании,

хранении и транспортировании (техническое обслуживание), а также по восстановлению работоспособности, исправности ресурса объекта и/или его составных частей (ремонт) [1]. Техническое обслуживание и ремонт включают такие процессы, как предварительное обследование оборудования, диагностика, ремонт, калибровка и настройка, а также тестирование и проверка на соответствие стандартам и требованиям [2].

Организация ТОиР медицинской техники связана с необходимостью соответствовать повышенным требованиям надежности и безопасности, поскольку в ходе некоторых лечебных мероприятий и процедур отказы и сбои недопустимы. Проблемы надежности медицинской техники в современных условиях эксплуатации широко обсуждаются в научном сообществе [3–5]. Для обеспечения бесперебойной работы необходимы высокоинтеллектуальное обслуживание и настройка оборудования [6].

Поддержание требуемого уровня надежности медицинских технических систем осуществляется путем проведения комплекса организационно-технических мероприятий, который включает периодическое техническое обслуживание, профилактические и восстановительные ремонтные процедуры [7, 8]. Для преодоления трудностей проведения этих мероприятий в современных условиях необходимо пересмотреть систему обслуживания и ремонта медицинской техники, например с помощью инструментов прогнозирования на основании заявленного и реального сроков службы деталей оборудования [9, 10]. В этом контексте в настоящее время расширяется практическое применение метода ремонта используемого оборудования по фактическому состоянию [11, 12].

Пути совершенствования системы организации мероприятий ТОиР в условиях цифровой трансформации на основе предиктивной аналитики результатов технического надзора за состоянием оборудования и прогнозирования структуры затрат времени на ремонт разных видов представлены в работах [13, 14]. Для повышения точности прогнозирования используются интеллектуальные технологии систем управления с использованием технологий анализа больших данных, машинного обучения и автоматизированного сбора показателей [15, 16]. Данные подходы позволяют обеспечить поддержание эксплуатационной надежности и предотвращение аварийных отключений в рамках системы ТОиР по фактическому техническому состоянию [17] с учетом предиктивности (предсказательности) и адаптивности (приспосабливаемости). Известны системы прогнозирования при проведении ТОиР, основанные на прогнозной диагностике и предиктивной аналитике [18, 19].

Учитывая существующий технический задел и современные тенденции по организации ТОиР с учетом возможностей технологий обработки данных, прогнозирования и предиктивной аналитики в качестве теоретической основы для организации технического обслуживания и ремонта медицинской техники в условиях ограниченного ресурса был выбран метод декомпозиции в иерархической структуре данных. Декомпозиция, как процесс разбиения на части, позволяет рассматривать любую исследуемую систему как сложную, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем [20, 21]. При этом в качестве критерия разбиения может рассматриваться не только структурирование или функциональное назначение, но и автономность и ремонтпригодность в рамках ТОиР. Таким образом, была предложена модель декомпозированного ресурса, описанная ниже.

Модель декомпозированного ресурса

С целью реализации рационального управления ТОиР медицинской техники была разработана модель декомпозированного ресурса, основанная на иерархическом разбиении единицы медицинского оборудования (устройства) на составляющие по критерию автономности и периодичности обслуживания и ремонта. Автономность означает реализуемость раздельного обслуживания и ремонта комплектующих с учетом требований надежности и безопасности оборудования. Периодичность в данном случае означает наличие плана упорядоченных событий обслуживания и ремонта, оптимизированного по времени, стоимости и доступности комплектующих.

Определим иерархические отношения декомпозиции единицы медицинского оборудования $q_i = q_i(\Delta t_i)$, где $i = 1 \dots Nq$ – условный порядковый номер каждой автономной единицы, Δt_i – интервал ТОиР в виде

$$D_{i,j} = D(q_i, q_j) = \{0, 1\}. \quad (1)$$

Для всех единиц медицинского оборудования определим план событий ТОиР в виде временного ряда

$$e_{i,k} = e_{i,k}(q_i, t_{i,k}, c_{i,k}) = \{0, 1\}, \quad (2)$$

где $t_{i,k}$ – планируемое время обслуживания и ремонта; $c_{i,k}$ – минимальная стоимость обслуживания, ремонта или замены единицы оборудования.

Если $e_{i,k} = 1$, то данное событие запланировано, 0 иначе. Это означает, что совокупность всех возможных вариантов ТОиР комплектующих единицы оборудования может быть упорядочена в виде дерева декомпозиции. Кроме отношений декомпозиции, события ТОиР связаны отношениями предшествования, что позволяет представить задачу в целом в виде ориентированного графа, узлами которого являются события ТОиР, а ребрами – переходы между ними. Пример построенного графа с разузлованием единицы медицинской техники в соответствии с принципом декомпозиции приведен на рис. 1.

Отметим, что в текущих условиях ограниченного ресурса стоимость крупноузлового ТОиР может быть как меньше, так и больше совокупной замены отдельных частей:

$$\forall q_i, q_j, e_{i,k} : c_{i,k} \neq \sum_j e_{j,k} \cdot c_{j,k} \cdot \delta(D(q_i, q_j)), \quad (3)$$

$$\text{где } \delta(x) = \begin{cases} 1, & x = \text{true}, \\ 0, & x = \text{false}. \end{cases}$$

Введем понятие ветви дерева декомпозиции в виде множества, которое содержит все события от терминального $q_l, D(q_l, \text{null})$ до родительского q_i :

$$B(q_i, q_l) = \{e_{n,k}\} : (e_{n,k} = e_{i,k} \in B(q_i, q_l)) \vee (e_{n,k} = e_{l,k} \in B(q_i, q_l)) \vee \\ \vee (e_{n,k} : \forall e_{m,k'}, D(q_m, q_n) \cdot \delta(e_{m,k'} \in B(q_i, q_l))). \quad (4)$$

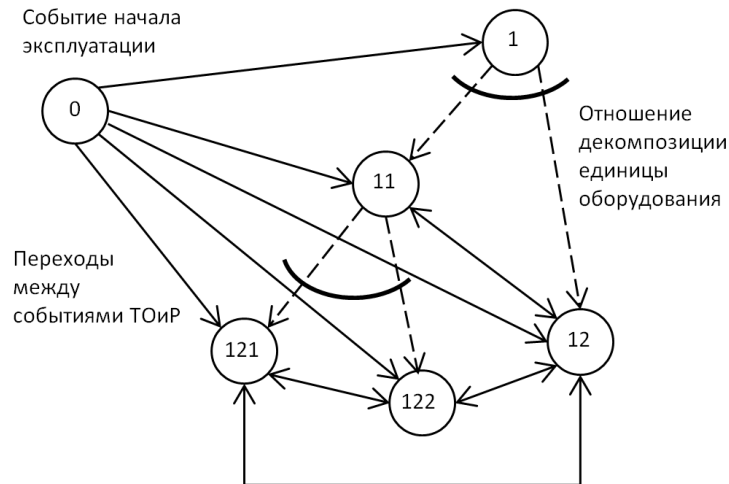


Рис. 1. Граф событий ТОиР для модели декомпозированного ресурса

Определим требование необходимости и достаточности обслуживания единицы медицинского оборудования q_i в виде требования единства покрытия событиями ТОиР его комплектующих q_j . Это означает, что для любого единичного, т.е. запланированного события, все события, находящиеся выше и ниже по иерархии ветви дерева декомпозиции, равны нулю. При этом каждая ветвь должна содержать хотя бы одно единичное значение:

$$q_i : \forall q_l, D(q_l, null) : \sum_{n,k} e_{n,k} \cdot \delta(e_{n,k} \in B(q_i, q_l)) = 1. \quad (5)$$

С учетом введенных определений задачу рационального управления ТОиР можно сформулировать как задачу оптимального планирования событий:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_q} e_{i,k} \cdot c_{i,k} &\rightarrow \min, \\ e_{i,k} \cdot t_{i,k} &< t_0 + \Delta t_i, \\ q_i : \forall q_l, D(q_l, null) : \sum_{n,k} e_{n,k} \cdot \delta(e_{n,k} \in B(q_i, q_l)) &= 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Данная задача является вариантом задачи о назначениях с ограничением по дереву декомпозиции. Особенность данной задачи состоит в вариативности выбора ресурсов, подлежащих замене при условии выполнения требований выбора компонентов декомпозиции.

Решение данной задачи может быть выполнено конструктивно путем организации прямого рекурсивного обхода дерева. Обход начинается с родительской вершины, для каждого уровня декомпозиции определяется суммарная стоимость, если при дальнейшей декомпозиции стоимость увеличивается, производится отсечение. Примеры решений приведены на рис. 2.

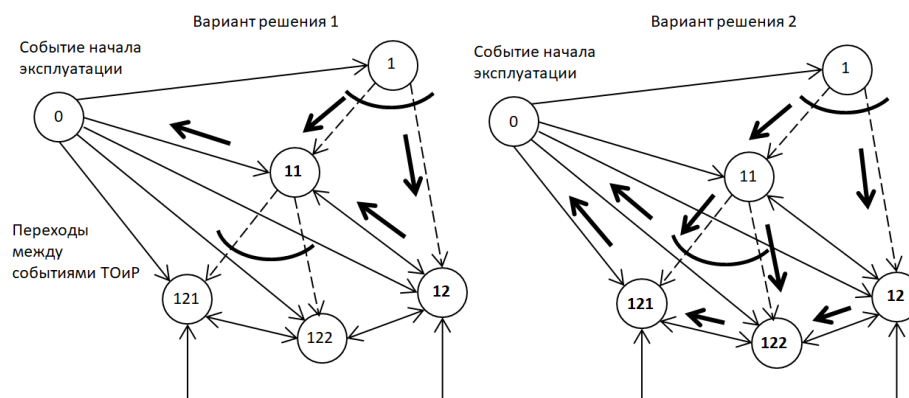


Рис. 2. Примеры обхода графа событий ТОиР в процессе решения задачи (6)

Таким образом, предлагается использовать указанную модель декомпозированного ресурса при решении задачи управления техническим обслуживанием и ремонтом при переходе от планирования по регламенту к планированию по ресурсу.

Результаты

Предложенная модель декомпозированного ресурса была реализована при планировании технического обслуживания и ремонта некоторых видов медицинской техники в клиниках Самарского государственного медицинского университета для случаев невозможности регламентного обеспечения запасными частями и комплектующими. Результаты применения этой модели на практике можно проиллюстрировать следующими примерами.

Рассмотрим наркозно-дыхательный аппарат Wato EX-35 компании Mindray. В service manual к данному аппарату написано следующее: «Эти таблицы являются достоверными, если аппарат используется 2000 часов в год. Вы должны обслуживать аппарат чаще, если вы его используете больше средней годовой наработки». Было выяснено, что все штатные неисправности аппарата связаны с заменой определенной части «комплекта обслуживания наркозного аппарата wato ex-35». Так, например, неисправность «замените кислородный датчик» говорит о том, что датчик кислорода вышел из строя и его следует заменить. Периодичность такой неисправности составляет год-полтора в зависимости от производителя датчика. Можно отметить, что появление утечки в аппарате свидетельствует о механическом повреждении любого резинового или силиконового уплотнителя аппарата, что говорит о требуемой замене. Данную замену проводят сразу вместе со всеми остальными резиновыми уплотнителями. Утечки на таких аппаратах появляются в среднем раз в два года, это говорит о том, что пора проводить техническое обслуживание аппарата.

По регламенту, описанному в service manual, обслуживание должно проводиться либо раз в год, либо каждые 2000 часов наработки. Но мы полагаем, что информация про 2000 часов была написана лишь для юридической безопасности производителя аппарата. В одном году 8760 часов. Представим, что

аппарат работает каждый день 24 часа в сутки. Таким образом, время срабатывания тревоги для каждого уплотнителя примем 8760 часов наработки.

За три года наблюдения за данными аппаратами в количестве 10 штук было выявлено, что датчик кислорода (№ 7) требует замены в среднем раз в год, замена bellow bag (№ 1) – раз в два года, замена датчиков потока (№ 10) – раз в три года, замена аккумулятора (№ 20) – раз в три года или вообще не требовалась (всегда работает от сети). Таким образом, время наработки для них было выбрано 8760, 17 520, 26 280 и 26 280 часов соответственно. Для остальных частей комплекта ТО было выбрано время 8760 часов, так как с утечкой аппарата приходится сталкиваться ежегодно, однако эти утечки можно устранить зачастую своими силами при помощи протяжки соединений. С утечками, которые уже нельзя назвать плавающими дефектами, приходится сталкиваться раз в два года.

За три года работы было выяснено, что, как правило, утечку газовой смеси дает один и тот же резиновый уплотнитель М6М-010051 (№ 15). После замены только данного резинового уплотнителя опытным путем было доказано, что аппарат может и дальше работать без утечки, не используя целый набор технического обслуживания.

Аналогично была составлена таблица событий декомпозированного ресурса для аппарата ИВЛ SV300 компании Mindray с учетом service manual этого аппарата. За три года работы аппараты не требовали технического обслуживания по замене частей из комплекта ТО для SV300. Исключениями являются аккумуляторы, из-за неисправности которых аппарат не может работать без сети, и датчики кислорода, чья замена необходима также в среднем раз в год-полтора.

Была составлена таблица событий декомпозированного ресурса для аппарата Fabius Tiro компании Drager с учетом service manual этого аппарата. Всего есть три вида сервисных наборов на Drager: MX08152, MX08832 и MX08153. Каждый набор ТО рассчитан на год, два года и три года соответственно. Можно сделать вывод о наработке этих частей в часах. В течение трех лет наблюдения за аппаратами было выявлено, что датчик кислорода требует замены каждый год-полтора. Аккумуляторы требовалось менять лишь раз за три года, датчик потока – каждые полгода. Было установлено, что некоторые виды утечек связаны с конкретными резиновыми и силиконовыми уплотнителями. Если присутствует утечка контура, как правило, требуется замена лишь диафрагм 8603780. Если присутствует утечка ИВЛ, то проблема может быть либо в 2600651, либо в 2600650. Если присутствует ошибка «сбой вентилятора» и давление рриптр меньше нормы, то проблема однозначно в резиновом уплотнителе 8404065. Из этого можно сделать вывод, что при конкретных проблемах необязательно заказывать целый набор ТО, а достаточно поменять конкретное уплотнительное кольцо.

Обсуждение

Модель декомпозированного ресурса может быть использована в качестве основы для построения базы данных эксплуатируемого медицинского оборудования организации здравоохранения, оценки и прогноза его технического состояния и автоматизированного планирования мероприятий технического обслуживания и ремонта. На базе основных определений модели может

быть сформулирована оптимизационная многокритериальная задача, решение которой возможно в автоматизированном виде методом обхода ветвей дерева декомпозиции медицинского оборудования. Решение данной задачи в автоматизированном виде обеспечивает формирование возможных решений по проведению ТОиР.

Основными преимуществами реализации предложенной модели на практике являются увеличение срока службы оборудования и сокращения простоев этого оборудования. Своевременная замена изношенных компонентов в соответствии с моделью декомпозированного ресурса способствует продлению общего срока службы медицинского оборудования. Это особенно актуально для дорогостоящих аппаратов, где преждевременная замена всего устройства является экономически нецелесообразной. Предиктивное обслуживание на основе данных об износе позволит планировать ремонтные работы заблаговременно, до возникновения критических поломок. Это минимизирует время простоя оборудования, обеспечивая непрерывность медицинского обслуживания и повышая эффективность работы учреждения.

Более того, появляется возможность значительно оптимизировать управление складскими запасами. Медицинское учреждение сможет поддерживать минимально необходимый уровень запасных частей, основываясь на реальных данных об износе, а не на предположениях. Это приведет к сокращению затрат на хранение и уменьшению риска устаревания неиспользованных компонентов.

Заключение

Предложенная модель декомпозированного ресурса позволяет реализовать адаптивные методы планирования и управления ТОиР медицинской техники в современных условиях. Данная модель предназначена для реализации в системах поддержки принятия решений по эксплуатации оборудования с ограниченным ресурсом. Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение объемов внедрения, выработку методических рекомендаций по использованию системы в практическом здравоохранении и оценку ее экономической эффективности.

Список литературы

1. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis // *Cancers*. 2023. Т. 15, № 14. Р. 3608.
2. Ганус Ю. А., Порфирьев А. С. Теоретические основы моделирования интегрированной логистической поддержки // *Экономика высокотехнологичных производств*. 2023. Т. 4, № 1. С. 51–72. doi: 10.18334/evp.4.1.119518
3. Морозов А. И., Рыков В. В. Обслуживание и ремонт медицинской техники. М. : Медицина, 2018. 328 с.
4. Болиева М. В. Проблема импортозамещения медицинского оборудования и его расходных материалов для проведения функциональных методов исследования в кардиологии // *Интернаука*. 2022. № 46-5 (269). С. 56–57.
5. Истомина Т. В. Современное состояние и перспективы применения инфокоммуникационных технологий в российской медицине // *Медицинская техника*. 2021. № 1 (325). С. 30–33.
6. Шелехов П. В., Омельяновский В. В. Анализ парка рентгенологического оборудования в Российской Федерации // *Медицинские технологии. Оценка и выбор*. 2023. № 3 (45). С. 26–32. doi: 10.17116/medtech20234503126

7. Басова Л. А., Мартынова Н. А., Кочорова Л. В. Проблемы надежности в медико-технической практике // *Здравоохранение*. 2014. № 1. С. 106–112.
8. Сидоров И. В. Техническое обслуживание медицинской техники: проблемы и перспективы // *Медицинская техника*. 2019. № 4. С. 3–8.
9. Нестерова Е. В., Игрунова С. В., Григоренко И. Н. [и др.]. Автоматизация прогнозирования неисправностей медтехники // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2024. № 3 (25). С. 13–22. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22
10. Ван Квонг Сай, Щербаков М. В. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2019. № 1 (45). С. 33–44.
11. Юрцев Е. С., Савинов Ю. И., Куликова Д. В., Жигарь А. Н. Современные методы диагностики сложных технических систем в условиях цифрового производства // *Станкоинструмент*. 2020. № 2 (19). С. 64–71.
12. Правда О. Ю., Яроцкая Н. А. Влияние высокоточной диагностики состояния оборудования на экономику промышленных предприятий // *Станкоинструмент*. 2022. № 2 (027). С. 78–81.
13. Постникова Е. С., Яроцкая Н. А., Сидоров И. М., Кошевой А. Р. Методы определения времени на техническое обслуживание и ремонт механообрабатывающего оборудования // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 9. С. 96–101. doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-96-97
14. Насонов М. А., Решетников И. С. Архитектурная трансформация системы технического обслуживания оборудования на промышленном производстве // *Автоматизация в промышленности*. 2025. № 3. С. 3–11.
15. Yang L., Chen Y., Ma X. [et al.]. A prognosis-centered intelligent maintenance optimization framework under uncertain failure threshold // *IEEE Transactions on Reliability*. 2024. Vol. 73, № 1. P. 115–130.
16. Cummins L., Sommers A., Ramezani S. B. [et al.]. Explainable predictive maintenance: a survey of current methods, challenges and opportunities // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 57574–57602.
17. Яхья А. А. Совершенствование моделей предиктивной диагностики и оценки состояния трансформаторного оборудования энергообъектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02. 2022. 193 с.
18. Поляков А. А., Чихладзе З. Д., Умнов П. И. Предиктивный анализ при проведении ТОИР // *Актуальные вопросы современной науки и образования : сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 20 мая 2021 г.) : в 2 ч. Пенза : Наука и Просвещение, 2021. Ч. 1. С. 40–43.*
19. Долгов О. С., Сафоклов Б. Б. Проектирование модели технического обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29, № 1. С. 19–26. doi: 10.34759/vst-2022-1-19-26
20. Taillard É. D. Decomposition methods. in: *design of heuristic algorithms for hard optimization* // *Graduate Texts in Operations Research*. Springer, Cham, 2023. P. 131–152. doi: 10.1007/978-3-031-13714-3_6
21. Nadkarni P. M. Metadata-driven software systems in biomedicine: designing systems that can adapt to changing knowledge. Springer Science & Business Media, 2011. P. 72.

References

1. Jiang X., Hu Z., Wang S., Zhang Y. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis. *Cancers*. 2023;15(14):3608.
2. Ganus Yu.A., Porfiriev A.S. Theoretical foundations of integrated logistics support modeling. *Ekonomika vysokotekhnologichnykh proizvodstv = Economics of high-tech industries*. 2023;4(1):51–72. (In Russ). doi: 10.18334/evp.4.1.119518

3. Morozov A.I., Rykov V.V. *Maintenance and repair of medical equipment*. Moscow: Meditsina. 2018:328. (In Russ)
4. Bolieva M.V. The problem of import substitution of medical equipment and its consumables for functional research methods. in cardiology. *Internauka = Internauka*. 2022;(46-5):56–57. (In Russ)
5. Istomina T.V. The current state and prospects of using information communication technologies in Russian medicine. *Meditsinskaya tekhnika = Medical technology*. 2021;(1):30–33. (In Russ)
6. Shelekhov P.V., Omelyanovsky V.V. Analysis of the fleet of X-ray equipment in the Russian Federation. *Meditsinskie tekhnologii. Otsenka i vybor = Medical technologies. Evaluation and selection*. 2023;(3):26–32. (In Russ). doi: 10.17116/medtech20234503126
7. Basova L.A., Martynova N.A., Kochorova L.V. Problems of reliability in medical and technical practice. *Zdravookhranenie = Healthcare*. 2014;(1):106–112. (In Russ)
8. Sidorov I.V. Maintenance of medical equipment: problems and prospects. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2019;(4):3–8. (In Russ)
9. Nesterova E.V., Igrunova S.V., Grigorenko I.N. et al. Automation of fault prediction of medical equipment. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and modeling in design and management*. 2024;(3):13–22. (In Russ). doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22
10. Wang Kwong Sai, Shcherbakov M.V. A method for predicting the residual resource based on data processing of multi-object complex systems. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: management and High Technologies*. 2019;1:33–44. (In Russ)
11. Yurtsev E.S., Savinov Yu.I., Kulikova D.V., Zhigar A.N. Modern diagnostic methods for complex technical systems in digital production conditions. *Stankoinstrument = Machine tools*. 2020;(2):64–71. (In Russ)
12. Pravda O.Yu., Yarotskaya N.A. The influence of high-precision diagnostics of equipment condition on the economy of industrial enterprises. *Stankoinstrument = Machine tools*. 2022;(2):78–81. (In Russ)
13. Postnikova E.S., Yarotskaya N.A., Sidorov I.M., Koshevoy A.R. Methods of determining time for maintenance and repair of machining equipment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2024;(9):96–101. (In Russ). doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-96-97
14. Nasonov M.A., Reshetnikov I.S. Architectural transformation of the system of technical maintenance of equipment in industrial production. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry*. 2025;(3):3–11. (In Russ)
15. Yang L., Chen Y., Ma X. et al. A prognosis-centered intelligent maintenance optimization framework under uncertain failure threshold. *IEEE Transactions on Reliability*. 2024;73(1):115–130.
16. Cummins L., Sommers A., Ramezani S.B. et al. Explainable predictive maintenance: a survey of current methods, challenges and opportunities. *IEEE Access*. 2024;12:57574–57602.
17. Yahya A.A. *Improving models of predictive diagnostics and assessment of the condition of transformer equipment of power facilities: PhD dissertation*. (In Russ)
18. Polyakov A.A., Chikhladze Z.D., Umnov P.I. Predictive analysis in the foresight of MRO. *Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki i obrazovaniya: sb. st. X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Penza, 20 maya 2021 g.) = Actual issues of modern science and education: collection of art. X International Scientific and Practical Conference (Penza, May 20, 2021)*. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2021;(1):40–43. (In Russ)
19. Dolgov O.S., Safoklov B.B. Designing an aircraft maintenance and repair model using artificial neural networks. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. 2022;29(1):19–26. (In Russ). doi: 10.34759/vst-2022-1-19-26

20. Taillard É.D. Decomposition methods. in: design of heuristic algorithms for hard optimization. *Graduate Texts in Operations Research*. Springer, Cham. 2023:131–152. doi: 10.1007/978-3-031-13714-3_6
21. Nadkarni P.M. *Metadata-driven software systems in biomedicine: designing systems that can adapt to changing knowledge*. Springer Science & Business Media, 2011:72.

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Владимирович Иващенко

доктор технических наук, профессор,
директор Передовой медицинской
инженерной школы,
Самарский государственный
медицинский университет
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

Anton V. Ivaschenko

Doctor of technical sciences, professor,
head of the Higher school of medical
engineering,
Samara State Medical University
(89 Chapayevskaya street, Samara, Russia)

Кирилл Константинович Машков

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова, 1А)
E-mail: k.k.mashkov@samsmu.ru

Kirill K. Mashkov

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1A Baidukova street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 14.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 10.06.2024

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025