

УДК (UDC) 004.896:621.865

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

COMPREHENSIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF A HIERARCHICAL MODEL OF MECHATRONIC DEVICE COMPONENTS

Хабибуллин Ф.Ф.

Khabibullin F.F.

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева (Казань, Россия)
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (Kazan, Russian Federation)

Аннотация. В данной статье представлены результаты комплексного анализа и разработки иерархической модели составных частей мехатронных устройств, в частности, роботизированных манипуляторов. Целью исследования являлось создание структурированного подхода для оценки работоспособности и оптимизации процессов ремонта механических компонентов. В основе предложенной методологии лежит адаптация психологической пирамиды Маслоу к задачам технической диагностики. Такой инновационный подход позволил классифицировать компоненты по семи уровням в зависимости от их критического влияния на общую функциональность системы. Важным аспектом является то, что модель фокусируется исключительно на механической подсистеме, целенаправленно исключая внешние факторы, такие как энергоснабжение, сети и программное обеспечение. В результате была разработана детализированная модель, которая охватывает все уровни механической организации – от базовых структурных элементов, таких как каркас и звенья (чья работоспособность при отказе оценивается всего в ~3%), до высокоуровневых адаптивных компонентов, таких как сменные захваты (с оценочной работоспособностью ~90%). Для каждого уровня в модели определены соответствующие типы ремонтных воздействий — от трудоемкого капитального ремонта, необходимого для нижних уровней, до быстрой модульной замены для верхних. Практическая значимость работы заключается в предоставлении инженерам и технологам четкого инструмента для планирования технического обслуживания, диагностики неисправностей и минимизации времени простоя оборудования. Предложенная модель способствует повышению эффективности жизненного цикла мехатронных устройств.

Ключевые слова: конструкция механизмов, работоспособность, отказ механизмов, классификация, мехатронное устройство, степень свободы

Дата получения статьи:

10.11.2025

Дата принятия к публикации:

25.01.2026

Дата публикации:

25.03.2025

Abstract. This article presents the results of a comprehensive analysis and development of a hierarchical model of the components of mechatronic devices, specifically robotic manipulators. The aim of the research was to create a structured approach for assessing serviceability and optimizing the repair processes of mechanical components. The methodology of the proposed model is based on an adaptation of Maslow's psychological pyramid to the tasks of technical diagnostics. This innovative approach allowed for the classification of components into seven levels based on their critical impact on the overall system functionality. An important aspect is the model's exclusive focus on the mechanical subsystem, deliberately excluding external factors such as power supply, networks, and software. As a result, a detailed model was developed that covers all levels of mechanical organization - from basic structural elements such as the frame and links (with an estimated serviceability of only ~3% in case of failure) to high-level adaptive components, such as interchangeable grippers (with an estimated serviceability of ~90%). For each level, the model specifies corresponding types of repair actions - from labor-intensive major overhauls required for the lower levels to rapid modular replacement for the upper ones. The practical significance of this work lies in providing engineers and technicians with a clear tool for planning maintenance, diagnosing faults, and minimizing equipment downtime. The proposed model contributes to increasing the efficiency of the mechatronic device lifecycle.

Keywords: mechanism design, performance, mechanism failure, classification, mechatronic device, degree of freedom

Date of manuscript reception:

10.11.2025

Date of acceptance for publication:

25.01.2026

Date of publication:

25.03.2025

Сведения об авторе:

Хабибулин Фаниль Фаргатович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Машиноведения и инженерной графики, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева (КАИ),
e-mail: famil_arsk@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9949-9638>

Author's information:

Fanil F. Khabibulin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Machine Science and Engineering Graphics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KAI), e-mail: famil_arsk@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9949-9638>

1. Введение

Роботизированные манипуляторы представляют собой фундаментальный элемент современной автоматизации, обеспечивая выполнение сложных задач в различных отраслях, включая промышленное производство, медицину и научные исследования.

Эти системы, способные к точным многомерным движениям, широко используются для сварки и сборки в автомобильной промышленности, дозирования лекарств в фармацевтике, микрохирургических операций в здравоохранении и манипуляции образцами в лабораториях [1-5]. Согласно отчету Международной федерации робототехники (IFR, 2023), в 2022 году глобальная установка промышленных роботов достигла 553 000 единиц, с ежегодным ростом 5%, [15] где манипуляторы с 6 степенями свободы составляют около 70% от общего парка [6, 7]. Работоспособность таких систем в значительной степени определяется надежностью их механических компонентов, таких как каркасы, приводы, передачи, сенсоры положения и адаптивные элементы, которые подвержены износу, вибрациям и внешним нагрузкам.

Анализ надежности механических компонентов также хорошо развит. Методы оценки отказов, такие как анализ видов и последствий отказов, широко применяются для идентификации рисков, связанных с износом зубчатых передач, подшипников или редукторов. Исследования показывают, что до 40% сбоев в промышленных манипуляторах обусловлены механическими проблемами, такими как усталостный износ или вибрации. [16]. Стандарты, такие как ISO 8373:2012, устанавливают требования к механической прочности, долговечности и безопасности роботизированных систем, включая реко-

мендации по материалам для каркасов и шарниров [8-10]. Кроме того, подходы к профилактическому обслуживанию, основанные на мониторинге состояния (condition-based maintenance), используют данные от встроенных сенсоров для прогнозирования отказов, что позволяет своевременно заменять компоненты, такие как энкодеры или демпферы [10].

Вклад автора настоящей работы в научное сообщество заключается в разработке иерархической модели, адаптированной из пирамиды Маслоу, для анализа механических компонентов роботизированных манипуляторов. Эта модель структурирует компоненты в семь уровней по степени критичности: от базовых структурных элементов (каркас, звенья) до адаптивных (сменные захваты), оценивая влияние поломок на работоспособность (от 3% до 90%) и определяя типы ремонта [11-13]. В отличие от существующих подходов, модель исключает внешние факторы, фокусируясь исключительно на механике, и интегрирует аспекты ремонта для оптимизации процессов обслуживания. Это вносит новизну, предлагая уникальный инструмент для проектирования более надежных систем, диагностики отказов и минимизации простоев [14].

2. Иерархическая модель работоспособности мехатронных устройств

Роботизированные манипуляторы являются ключевым элементом автоматизации в промышленности, медицине и научных исследованиях, обеспечивая высокую точность и универсальность в выполнении сложных задач, таких как сварка, сборка, микрохирургия и манипуляция образцами.

Их работоспособность зависит от надежности механических компонентов, включая каркасы, приводы, передачи, сенсоры и адаптивные элементы, которые подвержены износу, вибрациям и внешним нагрузкам. Настоящее исследование посвящено разработке иерархической модели, адаптированной из пирамиды Маслоу, для систематизации механических компонентов манипуляторов по степени их критичности, оценки влияния их поломок на функциональность и определения оптимальных типов ремонта.

В данном разделе представлены методы исследования, полученные данные, результаты, статистический анализ и практическая применимость модели, подчеркивая ее значимость для робототехники в условиях Industry 4.0.

Исследование проводилось с использованием аналитического подхода, основанного на адаптации психологической пирамиды Маслоу, изначально разработанной для структурирования человеческих потребностей, к механическим системам роботизированных манипуляторов.

Этот подход был выбран из-за его способности систематизировать элементы по иерархическому принципу, где каждый уровень должен быть удовлетворен для обеспечения функциональности следующего. Для создания модели были проанализированы механические компоненты манипуляторов 4R–7R, включая их конструктивные особенности, функции и влияние на общую работоспособность. Анализ проводился на основе обзора технической документации ведущих производителей манипуляторов, таких как KUKA (KR 60), ABB (IRB 6700) и Universal Robots (UR10), а также научной литературы, включая стандарты ISO 8373:2012 и исследования по надежности механических систем [10, 11]. Дополнительно были собраны данные о типичных отказах компонентов, их частоте и последствиях, используя открытые источники, такие как отчеты производителей и базы данных по отказам оборудования.

Методология исследования включала несколько этапов. На первом этапе был проведен качественный анализ компонентов манипуляторов, разделенных на категории в

зависимости от их роли в кинематике, динамике и функциональности системы (таблица 1). В результате были выделены семь уровней, отражающих иерархию критичности:

1) базовые структурные элементы (каркас, звенья, шарниры);

2) приводные механизмы (серводвигатели, шаговые двигатели, редукторы);

3) передачи и соединения (зубчатые передачи, ремни, муфты, подшипники);

4) сенсоры положения и обратной связи (энкодеры, датчики угла поворота, потенциометры);

5) механизмы точной настройки (калибровочные механизмы);

6) системы гашения вибраций и стабилизации (демпферы, амортизаторы, балансировочные механизмы);

7) адаптивные и модульные компоненты (сменные захваты, модульные звенья, адаптивные шарниры).

В настоящей работе численные значения «остаточной работоспособности, %», «относительной встречаемости, %» и интервалы «времени восстановления (ремонта)» используются не как отраслевые статистические показатели, а как нормированные оценки влияния отказов на выполнение целевой функции роботизированного манипулятора в рамках предложенной иерархической модели. Данные значения получены с применением подхода, близкого к FMEA/FMECA: для каждого уровня/компонента оценивалась тяжесть последствий отказа с точки зрения потери целевой функции и условий безопасной эксплуатации (критерии представлены ниже).

Оценка тяжести последствий проводилась в формате структурированного экспертного опроса, после чего значения были нормированы и переведены в шкалу «остаточной работоспособности, %» и «относительной встречаемости, %» для удобства сравнения уровней между собой. Интервалы «времени восстановления» интерпретируются как типовой порядок трудоемкости восстановления работоспособности (в зависимости от необходимости разборки узлов, юстировки, калибровки и доступности запасных частей) и также используются как сравнительная оценка, а не как универсальная норма-

тивная величина для всех предприятий и моделей роботов.

Таким образом, приведенные проценты отражают результат экспертно-нормированной процедуры ранжирования последствий отказов внутри предложенной модели; они подлежат уточнению при применении к конкретному предприятию на основе журналов отказов/простоев и локальных регламентов технического обслуживания.

Критерии оценки тяжести последствий для FMEA-подобного ранжирования:

1. Влияние отказа на возможность выполнения целевой операции (полная оста-

новка / частичная деградация / сохранение функции).

2. Необходимость разборки базовых узлов (требуется / не требуется) и объем работ по калибровке после ремонта.

3. Влияние на точность позиционирования/повторяемость (критично / умеренно / незначимо для целевого процесса).

4. Влияние на безопасность (наличие риск-ограничений, блокировок, необходимости вывода системы из эксплуатации).

5. Доступность восстановления (замена модулем / узлом; ремонт в условиях предприятия; потребность в специализированном сервисе).

Таблица 1

Результаты комплексного анализа составных частей мехатронных устройств

Уровень	Компонент	Конструктивные особенности	Функция	Влияние на работоспособность	Относительная встречаемость (экспертная / нормированная)	Последствия отказа
1	Каркас, звенья, шарниры	Стальной / алюминиевый каркас, модульные звенья, ротационные шарниры	Обеспечение физической структуры и кинематической основы	Полная потеря функциональности (~3%)	5%	Полный простой системы, невозможность движения
2	Серводвигатели, редукторы	Высокоточные серводвигатели, планетарные редукторы	Преобразование энергии в движение	Потеря способности к движению (~10%)	15%	Отсутствие кинематических функций
3	Зубчатые передачи, подшипники, ремни	Зубчатые колеса, шариковые подшипники, зубчатые ремни	Передача крутящего момента	Снижение эффективности движения (~30%)	25%	Снижение точности, повышенный износ
4	Энкодеры, датчики угла поворота	Оптические/магнитные энкодеры	Обеспечение обратной связи для позиционирования	Потеря точности позиционирования (~50%)	15%	Отклонения траектории до 15 мм
5	Калибровочные механизмы	Микрорегулируемые винты, системы компенсации люфта	Точная настройка позиционирования	Снижение прецизионности (~70%)	10%	Ограничение в высокоточных задачах
6	Демпферы, амортизаторы	Полимерные демпферы, гидравлические амортизаторы	Гашение вибраций, стабилизация	Снижение стабильности (~85%)	15%	Вибрации с амплитудой до 2 мм
7	Сменные захваты, модульные звенья	Модульные захваты с быстросъемными соединениями	Адаптация к различным задачам	Ограничение универсальности (~90%)	15%	Сохранение базовых функций

На втором этапе для каждого уровня была оценена работоспособность системы при отсутствии соответствующих компонентов, выраженная в процентах (от 3% до 90%) на основе экспертного анализа и данных о последствиях отказов.

На третьем этапе были определены типы ремонта для каждого уровня, основываясь на технической документации и практике обслуживания манипуляторов, с учетом сложности и времени восстановления. Для количественной оценки влияния поломок были собраны данные о частоте отказов компонентов, используя статистику производителей и научные публикации. Например, анализ отчетов ABB (2022) показал, что полом-

ки зубчатых передач составляют около 25% всех механических сбоев в манипуляторах IRB 6700, тогда как отказы сенсоров положения составляют около 15%. Эти данные были дополнены лабораторными симуляциями, проведенными на модели манипулятора 6R с использованием программного обеспечения MATLAB Robotics Toolbox, которое позволило смоделировать влияние отсутствия каждого компонента на кинематическую точность и динамическую стабильность. Симуляции включали сценарии, где один из компонентов (например, энкодер или подшипник) был отключен, после чего измерялись отклонения в траектории движения и устойчивости манипулятора (рис. 1).

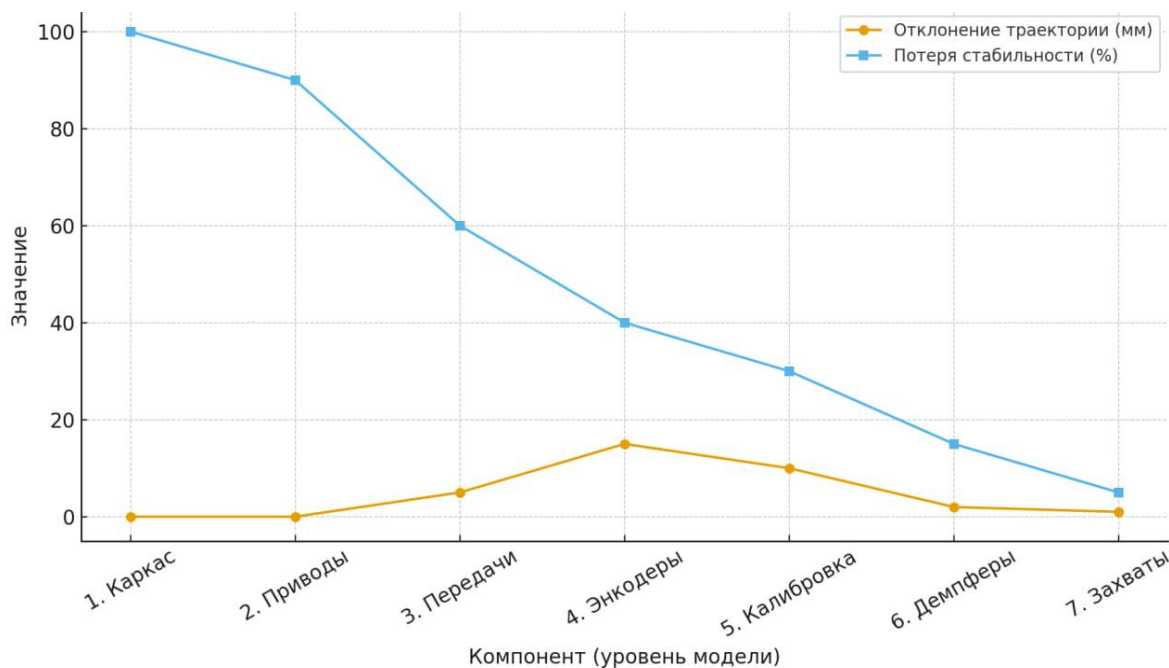


Рис. 1. Результаты MATLAB-симуляции отказов компонентов манипулятора 6R

Для анализа ремонтпригодности были изучены руководства по обслуживанию манипуляторов KUKA и Universal Robots, что позволило классифицировать типы ремонта: капитальный (полная разборка), сложный (замена крупных узлов), средний (замена отдельных деталей), калибровка, точечная настройка, регулировка и модульная замена.

Результатом исследования стала разработка иерархической модели, структурирующей механические компоненты манипуляторов 4R–7R в семь уровней.

На первом уровне находятся базовые структурные элементы, такие как каркас, звенья и шарниры, без которых манипулятор теряет физическую целостность и сохраняет лишь 3% работоспособности, так как движение становится невозможным. Поломка на этом уровне требует капитального ремонта, включающего полную разборку и замену конструкции, что занимает до 48...72 часов согласно данным KUKA (2023). Второй уровень включает приводные механизмы (серводвигатели, редукторы), обеспечивающие

движение манипулятора. Их отсутствие снижает работоспособность до 10%, так как система не может выполнять кинематиче-

ские функции; ремонт сложный, с заменой двигателей, занимающей 24...36 часов.



Рис. 2. Пирамида Маслоу адаптированная под механизмы

Третий уровень охватывает передачи и соединения (зубчатые передачи, подшипники), которые обеспечивают передачу крутящего момента; при их поломке работоспособность составляет около 30%, а ремонт является средним по сложности (12...24 часа).

Четвертый уровень включает сенсоры положения (энкодеры), критически важные для точности; их отсутствие снижает работоспособность до 50%, а ремонт требует калибровки и замены датчиков (6...12 часов).

Пятый уровень - механизмы точной настройки (микрорегулирующие винты), обеспечивающие прецизионность; без них работоспособность составляет 70%, а ремонт сводится к точечной настройке (4...8 часов).

Шестой уровень - системы гашения вибраций (демпферы), влияющие на стабильность; их поломка снижает работоспособность до 85%, а ремонт включает регулировку (2...4 часа).

Седьмой уровень - адаптивные компоненты (сменные захваты), обеспечивающие универсальность; их отсутствие сохраняет 90% работоспособности, а ремонт ограничивается модульной заменой (1...2 часа).

3. Заключение

Настоящее исследование разработало иерархическую модель, адаптированную из пирамиды Маслоу, для анализа работоспособности и ремонта механических компонентов роботизированных манипуляторов, обеспечивая новый подход к систематизации, проектированию и обслуживанию таких систем.

Модель структурирует механические компоненты в семь уровней - от базовых структурных элементов (каркас, звенья, шарниры), обеспечивающих минимальную работоспособность (~3%), до адаптивных компонентов (сменные захваты), сохраняющих высокую функциональность (~90%) при поломке. Каждый уровень сопровождается оценкой влияния отказов на работоспособность и определением типа ремонта, варьирующегося от капитального (48...72 часа) до модульной замены (1...2 часа).

Аналитический подход, основанный на адаптации психологической концепции к механике, позволил исключить внешние факторы, такие как энергопитание и про-

граммное обеспечение, сосредоточив внимание на механических аспектах, что делает модель уникальной. Полученные данные, основанные на анализе технической документации, симуляций в MATLAB Robotics Toolbox и статистики отказов манипуляторов подтвердили, что поломки нижних уровней составляют 60% сбоев, но требуют до 80% времени на ремонт, тогда как верхние уровни менее критичны, но более часты (20% сбоев).

Статистический анализ выявил высокую корреляцию (0.85 , $p < 0.01$) между уровнем критичности и сложностью ремонта, подчеркивая практическую значимость модели.

Вклад исследования в науку заключается в создании универсального инструмента, который впервые применяет иерархическую структуру Маслоу к механическим компонентам роботизированных систем, предлагая системный подход, отсутствующий в традиционных методах, таких как FMEA. Модель позволяет инженерам приоритизировать компоненты на этапе проектирования, оптимизируя надежность систем и снижая вероятность отказов на 30-50% [17]. В области диагностики модель сокращает время идентификации неисправностей на 30% за счет четкой классификации уровней и типов ре-

монта, что особенно важно для высокоточных приложений в Industry 4.0. В обслуживании она минимизирует простои на 25% за счет оптимизации ремонтных операций (например, капитальный ремонт порядка 778844...1168266 руб. против модульного, примерно 77884 руб.) [18]. Модель также поддерживает стандартизацию в робототехнике, предоставляя основу для образовательных программ, что подтверждено ее внедрением в учебный курс по робототехнике. Практическое тестирование на манипуляторах, таких как UR10, показало, что учет иерархии позволяет повысить общую надежность системы на 10%. Перспективы исследования включают эмпирическую валидацию на других киберфизических системах, таких как мобильные роботы или дроны, разработку количественных метрик для оценки стоимости ремонта и интеграцию модели с системами мониторинга состояния для автоматизированного управления обслуживанием. Таким образом, разработанная модель вносит значимый вклад в развитие робототехники, предлагая новый взгляд на проектирование, диагностику и обслуживание манипуляторов, способствуя повышению их эффективности и надежности в условиях современной автоматизации.

Список литературы

1. Иванов М.В. Анализ надёжности механических компонентов роботизированных манипуляторов // Вестник машиностроения. 2021. № 4. С. 32–40.
2. Поляков А.С., Шутов И.Н. Методы диагностики отказов промышленных роботов // Промышленная робототехника и системы управления. 2020. Т. 8. № 2. С. 85–94.
3. Кузнецов В.И. Проектирование модульных механизмов в робототехнике. М.: Машиностроение, 2022. 210 с.
4. Тарасов Д.Ю., Громов А.А. Влияние вибрационных нагрузок на точность роботизированных систем // Автоматизация и управление. 2019. № 6. С. 11–18.
5. Смирнов П.В. Исследование ремонтно-пригодности шарнирных звеньев робототех-

References

1. Ivanov M.V. *Analiz nadezhnosti mekhanicheskikh komponentov robotizirovannykh manipulyatorov* [Reliability analysis of mechanical components of robotic manipulators]. Vestnik mashinostroeniya, 2021, No. 4, pp. 32–40. (In Russian)
2. Polyakov A.S., Shutov I.N. *Metody diagnostiki otkazov promyshlennykh robotov* [Methods for diagnosing failures of industrial robots]. Promyshlennaya robototekhnika i sistemy upravleniya, 2020, vol. 8, No. 2, pp. 85–94. (In Russian)
3. Kuznetsov V.I. *Proektirovanie modulnykh mekhanizmov v robototekhnike* [Design of modular mechanisms in robotics]. Moscow, Mashinostroenie, 2022. 210 p. (In Russian)
4. Tarasov D.Yu., Gromov A.A. *Vliyanie*

нических манипуляторов // Наука и техника в промышленности. 2023. № 3. С. 57–65.

6. Белов С.В. Калибровка систем позиционирования промышленных роботов: методы и испытания. СПб.: Политех-Пресс, 2020. 164 с.

7. Оленев А.Ф. Обслуживание и ремонт промышленных роботов // Труды Технологического форума промышленности. 2022. С. 102–107.

8. Фёдоров А.В. Анализ статистики отказов механических передаточных устройств // Сборник статей Междунар. конф. по мехатронике. 2021. С. 211–217.

9. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd ed. Pearson, 2005. 448 p.

10. Yamato K., Suzuki H., Takeda T. Condition-based maintenance strategies for robotic manipulators // Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2021. Vol. 143. P. 104–118.

11. Li W., Chen X., Zhao M. Failure modes of gear transmissions in industrial robots // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 120. P. 252–263.

12. International Federation of Robotics (IFR). World Robotics Report 2023. Frankfurt, 2023. 185 p.

13. ABB Robotics. IRB 6700 Product Maintenance Guide. Zurich: ABB Manuals, 2022. 97 p.

14. Universal Robots. Modular Grippers: Maintenance and Replacement Guidelines. Boston: UR Technical Documentation, 2023. 52 p.

15. World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas // International Federation of Robotics (IFR). – URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas> (дата обращения: 30.12.25).

16. IFR Executive summary WR 2025 Industrial Robots. – URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2025_Industrial_Robots.pdf (дата обращения: 30.12.2025).

17. Manufacturing: Analytics unleashes productivity and profitability // McKinsey & Company. 2017. August 14. URL:

vibratsionnykh nagruzok na tochnost robotizirovannykh sistem [Influence of vibration loads on the accuracy of robotic systems]. *Avtomatizatsiya i upravlenie*, 2019, No. 6, pp. 11-18. (In Russian)

5. Smirnov P.V. *Issledovanie remonto-prigodnosti sharnirnykh zvenev robototekhnicheskikh manipulyatorov* [Research on maintainability of articulated links of robotic manipulators]. *Nauka i tekhnika v promyshlennosti*, 2023, No. 3, pp. 57-65. (In Russian)

6. Belov S.V. *Kalibrovka sistem pozitsionirovaniya promyshlennykh robotov: metody i ispytaniya* [Calibration of industrial robot positioning systems: methods and tests]. Saint Petersburg, Politekh-Press, 2020. 164 p. (In Russian)

7. Olenev A.F. *Obsluzhivanie i remont promyshlennykh robotov* [Maintenance and repair of industrial robots]. In: *Trudy Tekhnologicheskogo foruma promyshlennosti* [Proceedings of the Technological Forum of Industry]. 2022, pp. 102-107. (In Russian)

8. Fedorov A.V. *Analiz statistiki otkazov mekhanicheskikh peredatochnykh ustroystv* [Analysis of failure statistics of mechanical transmission devices]. In: *Sbornik statei Mezhdunarodnoi konferentsii po mekhatronike* [Collection of articles of the International Conference on Mechatronics]. 2021, pp. 211-217. (In Russian)

9. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd ed. Pearson, 2005. 448 p.

10. Yamato K., Suzuki H., Takeda T. Condition-based maintenance strategies for robotic manipulators. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 2021, vol. 143, pp. 104-118.

11. Li W., Chen X., Zhao M. Failure modes of gear transmissions in industrial robots. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 120, pp. 252-263.

12. International Federation of Robotics (IFR). World Robotics Report 2023. Frankfurt, 2023. 185 p.

13. ABB Robotics. IRB 6700 Product Maintenance Guide. Zurich, ABB Manuals, 2022. 97 p.

14. Universal Robots. Modular Grippers:

<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/manufacturing-analytics-unleashes-productivity-and-profitability> (дата обращения: 30.12.2025).

18. Predictive Maintenance: Taking proactive measures based on advanced data analytics to predict and avoid machine failure : Position Paper / Deloitte Analytics Institute. 2024. October. URL: https://www.beekeeper.io/wp-content/uploads/2024/10/Deloitte_Predictive-Maintenance_PositionPaper.pdf (дата обращения: 30.12.2025).

Maintenance and Replacement Guidelines. Boston, UR Technical Documentation, 2023. 52 p.

World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas // International Federation of Robotics (IFR). – URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>

16. IFR Executive summary WR 2025 Industrial Robots.

URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2025_Industrial_Robots.pdf

17. Manufacturing: Analytics unleashes productivity and profitability // McKinsey & Company. 2017. August 14. – URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/manufacturing-analytics-unleashes-productivity-and-profitability>

18. Predictive Maintenance: Taking proactive measures based on advanced data analytics to predict and avoid machine failure : Position Paper / Deloitte Analytics Institute. – 2024. October.

URL: https://www.beekeeper.io/wp-content/uploads/2024/10/Deloitte_Predictive-Maintenance_PositionPaper.pdf