

УДК 004.896

DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.025

А. В. Кизим¹, А. В. Матохина¹, А.Г. Кравец¹, И.П.Мединцева²

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

¹Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Россия

²Волгоградский институт управления – филиал Российской академии
народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ,
Волгоград, Россия

В работе описано развитие системы представления знаний об оборудовании как технической системе, сочетающей модели представления знаний о структуре, параметрах и функционировании системы. Показана архитектура интеллектуальной платформы мониторинга, диагностики и модернизации технических систем на различных стадиях жизненного цикла. Разработанные подсистемы позволяют проводить анализ текущего состояния технической системы, прогнозировать последующие состояния, проводить диагностику неисправностей и предлагать варианты модернизации, с учетом заданных целей, или по результатам проведенного анализа технических характеристик работы системы. Приведена классификация основных целей модернизации оборудования. Приведено описание метода модернизации оборудования для целей мониторинга, как конечного изделия, так и технологического оборудования. Представлена онтология общепромышленного оборудования, включающая классы, необходимые для построения прецедентов модернизации оборудования, с учетом цели модернизации. Предложенная онтология включает развернутое представление данных и знаний по основным видам общепромышленного оборудования, а также диагностические правила, для поиска неисправностей некоторых типов оборудования. Предложено формальное описание прецедентов модернизации оборудования. Показана актуальность разработки для современных промышленных предприятий, в рамках национальной программы и концепции современного производства. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-01200.

Ключевые слова: онтологический инжиниринг, модернизация производства, техническое обслуживание и ремонт, жизненный цикл.

Введение

Производительность любого предприятия напрямую зависит от работоспособности его оборудования. Работоспособность оборудования обеспечивается за счет качественного, своевременного и безопасного проведения модернизации и технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОиР) при рациональном использовании ресурсов.

Особенное значение теме исследования придает то, что Правительство РФ в 2018 г. утвердило национальную программу «Цифровая

экономика Российской Федерации». Цель программы - системное развитие и внедрение цифровых технологий во все области жизни. Общемировая концепция современного производства «Индустрия 4.0» подразумевает не только широкое применения информационных технологий в производстве, а также создание новых поколений оборудования, объединенных в одну цифровую экосистему [12]. Базовыми компонентами управления в производственной отрасли являются модернизация и цифровая трансформация производственных операций, обеспечения эксплуатации оборудования, процессов поддержки принятия решений.

Материалы и методы

Анализ задач модернизации на производственных предприятиях Волгоградской области

Задачи модернизации и развития производств, создания новых предприятий — стратегические задачи промышленности Волгоградской области. Использование научного потенциала региона, модернизация и развитие производств — стратегические задачи индустриального сектора Волгоградской области, обозначенные губернатором А.И. Бочаровым. Промышленность является драйвером экономики, ей принадлежит ведущая роль в увеличении валового регионального продукта к 2021 году до одного триллиона рублей.

По информации комитета промышленности и торговли Волгоградской области, увеличению объемов производства продукции и динамике индекса способствовало завершение в 2017 году ряда инвестиционных проектов в промышленности. В частности, создано новое производство химических средств защиты растений на предприятии ООО «Волга Индастри»; производство по выпуску труб на ООО «Волжский трубопрофильный завод»; производство импортозамещающих змеевиков, коллекторов, радиационных комплектов, радиантных труб для нужд нефтехимической промышленности на ЗАО НПО «Ахтуба». Открыто новое производство канатов специального назначения на Волгоградском филиале АО «Северсталь канаты». Социально значимое производство ортопедической обуви создано на предприятии «Доктор Орт». АО «Волтайр Пром» открыло линию по выпуску новых типоразмеров сельскохозяйственных шин, ООО «Волгабас» — современное производство шасси.

Были выполнены различные работы с предприятиями региона, такими как ООО «Волгограднефтемаш», ООО «Нефтезаводмонтаж», ЦКБ «Штиль», ФНПЦ «Титан-Баррикады», ООО «Волгограднефтепроект», ООО «Волгоградсервис», ООО «Лукойл-Информ» и др. Руководство предприятий заинтересовано в модернизации парка оборудования, а также

в совершенствовании процесса технического обслуживания, мониторинга и управления состоянием ТС. Очень часто, для этих целей создаются отдельные подразделения. Однако модернизация выполняется исключительно в разрезе закупок нового технического парка. Случаи замены или дополнения узлов системы с целью улучшения ее производственных характеристик крайне редки. В тоже время система технического обслуживания и ремонта оборудования – одна из наиболее сложных областей системы управления производством. Отказы оборудования могут иметь катастрофические последствия не только для выполнения производственной программы, но и жизнеспособности и устойчивости предприятия в целом. Однако существующие регламенты технического обслуживания, зачастую, не позволяют учесть текущий износ или скрытые отказы оборудования.

В качестве основных целей модернизации оборудования, востребованных в регионе, можно выделить следующие группы:

1. Повышение степени автономности (автоматизация) функционирования.
2. Улучшение рабочих характеристик, например, увеличение:
 - габаритных размеров обрабатываемых заготовок,
 - точности измерения или производства,
 - увеличение пропускной способности,
 - расширение спектра рабочих материалов.
3. Повышение эффективности мониторинга и диагностики состояния оборудования и конечного продукта.

Эти цели позволяют организовать выпуск продукции с улучшенными характеристиками, повысить эффективность парка технологического оборудования, тем самым сократить затраты процессов производства и технического обслуживания. Проведенный анализ показал следующее распределение по целям модернизации (Рисунок 1).

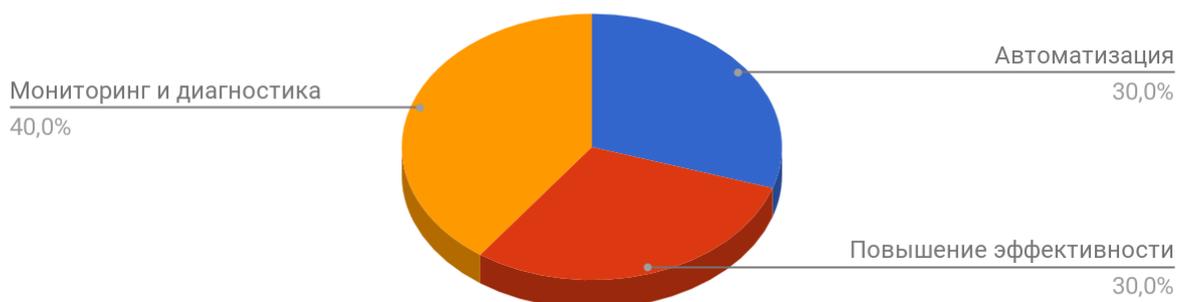


Рисунок 1 – Распределение целей модернизации в Волгоградской области

Повышение эффективности и автоматизация парка технологического оборудования, напрямую зависит от стадии жизненного цикла, не только самого оборудования, но и производимого товара. Прогноз потребности модернизации по этим целям эффективнее строить в зависимости от стадии зрелости конечного продукта [1].

Мониторинг технической системы

Как показали результаты исследований предприятий региона, самой востребованной является цель повышения эффективности диагностики и мониторинга состояния как самого оборудования, так и конечного продукта. Достижение этой цели ведет к повышению эффективности целого ряда ключевых показателей, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом оборудования, а также с контролем технологического процесса производства[4].

Мониторинг технической системы (ТС) позволяет получить полную информацию о ее состоянии. Диагностика состояния обычно выполняется специалистом, что вносит субъективность в процесс и допускает появление лишних ошибок, которые могут приводить к дополнительным расходам.

Внедрение в ТС дополнительных средств автоматического мониторинга состояния является модернизацией системы. Подобного рода модернизация позволяет проводить своевременную диагностику, тем самым повысить эффективность технического обслуживания и ремонта ТС.

В ходе исследования был предложен метод мониторинга ключевых показателей эффективности ТС. Метод содержит следующие шаги:

1. Определение параметров мониторинга:
 - формирование возможного списка измеряемых значений;
 - предварительная оценка затрат на модернизацию системы.
2. Определение вариантов контрольно-измерительного оборудования, путем формирования запроса к онтологии.
3. Выбор варианта контрольно-измерительного оборудования с использованием библиотеки методов принятия решений.
4. Построение структурно-геометрических параметров ТС, для определения мест установки контрольно-измерительного оборудования.
5. Интеграция собираемых данных в систему управления:
 - 5.1. подбор средств сбора и передачи данных

5.2. формализация знаний агента диагностики состояния ТС, а именно:

- определение рабочих диапазонов значений;
- построение дерева диагностики состояния при выходе за пределы диапазона рабочих значений.

Процесс диагностики ТС начинается с контроля (мониторинга и диспетчеризации) компонентов и комплексов ТС. Однако их применение повышает стоимость обслуживания и квалификацию персонала. Применение систем автоматизации на этапе диспетчеризации позволяет значительно повысить эффективность и сократить затраты на устранения отказов и повышение эффективности ТС.

База знаний прецедентов модернизации

Для решения задачи модернизации оборудования с целью повышения его эффективности следует использовать разработанную базу знаний прецедентов модернизации. Формальное описание прецедента включает следующие данные:

1. Структурно-параметрическую схему ТС до и после модернизации.
2. Функционально-параметрическую схему ТС до и после модернизации.
3. Геометрическую модель сборки ТС до и после модернизации [8].
4. Описание цели модернизации.
5. Описание задач модернизации.
6. Описание альтернатив технических решений модернизации [8].

Новизна модели представления знаний модернизации ТС заключается в привязке к геометрической сборке модернизируемых узлов ТС, что позволяет повысить эффективность модернизации. Описание процесса получения формальных знаний из геометрической сборки ТС показано в отчете за первый год. Описание процедур модернизации ТС, методов использующиеся при выполнении процедур и моделей представления данных и знаний для выполнения процедур, показано в [3].

Как видно из структуры, полноценное описание прецедента модернизации требует большого объема документов. Автоматизированная обработка с целью получения достаточного объема примеров затруднительна ввиду отсутствия примеров, имеющих достаточное описание. Чаще всего, не полномасштабная модернизация парка оборудования ведется силами сотрудников организации, которые не всегда

документируют свое решение. В случае полномасштабных изменений, работы осуществляет проектная организация, доступ к документам которой ограничен. На текущий момент ведется наполнение базы знаний прецедентов модернизации, но применение методов модернизации с целью повышения эффективности оборудования возможно в узкоспециализированной сфере, в которой авторы проводили исследования и апробацию методов.

Результаты и обсуждение

При решении задачи стандартизации данных и знаний о технических системах, участниками проекта проводился обзор методов представления знаний. По результатам обзора, в качестве основной модели представления знаний о технических системах, выбрана онтология. Онтологическая модель позволяет формировать иерархию классов систем, организовывать различные по природе связи среди элементов классов, назначать свойства классам и использовать при этом различные типы данных. Кроме этого есть возможность повышать компетенции онтологии, дописывая продукционные правила с использованием SWRL методов, а также использовать методы CBR для вывода на прецедентах.

Сгенерирована таксономия по промышленному оборудованию, описанному в классификаторах. Разработана система, позволяющая автоматически заполнять экземпляры классов онтологии. Работа системы проверена на примере заполнения онтологии насосного оборудования.

В процессе работы создана онтология контрольно-диагностического оборудования. Онтология позволит организовать выбор необходимого контрольно-диагностического оборудования для разработки системы мониторинга, диагностики и управления технической системой. Разработанная иерархия классов онтологии показана на Рисунке 2.

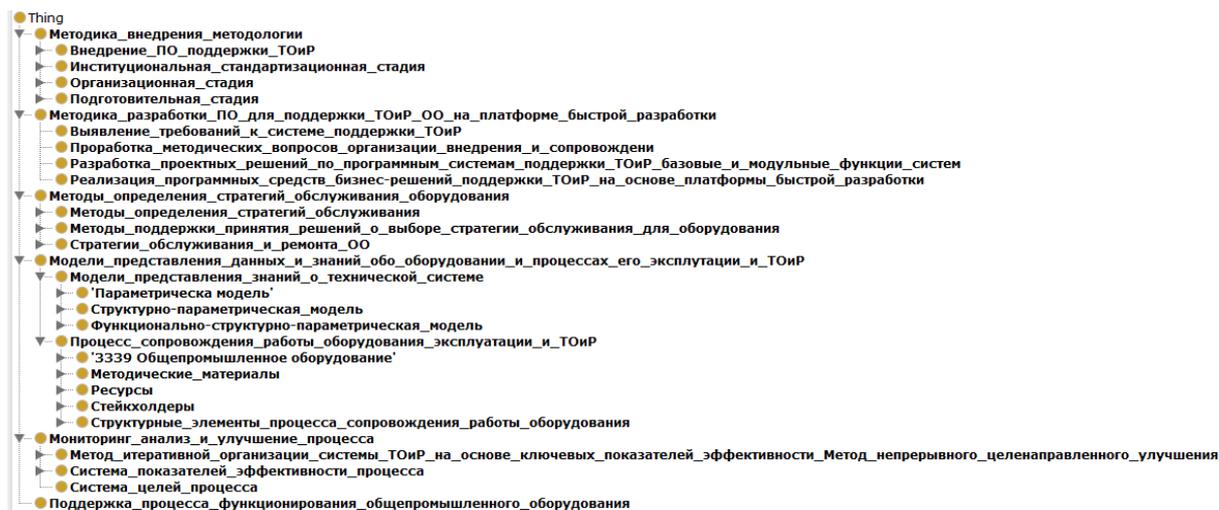


Рисунок 2 – Иерархия классов онтологии промышленного оборудования

На сегодняшний момент, онтология содержит развернутое представление данных и знаний по следующим предметным областям:

- насосное оборудование;
- станки с ЧПУ;
- электротехническое оборудование;
- компьютерная техника;
- дорожно-строительное оборудование;
- диагностика неисправности чиллеров[7];
- диагностика неисправности оргтехники.

В перспективе авторы предполагают продолжить работу по заполнению онтологии экземплярами классов, добавить диагностические правила и прецеденты модернизации. На сегодняшний момент процесс заполнения онтологии осуществляется с использованием системы Protégé. По предметным областям, в которых проводились исследования и апробация методов, ведется автоматическое заполнение экземпляров онтологии.

Интеллектуальная платформа мониторинга, диагностики и модернизации ТС

Архитектура интеллектуальной платформы мониторинга, диагностики и модернизации технических систем на различных стадиях жизненного цикла представлена на Рисунке 3.

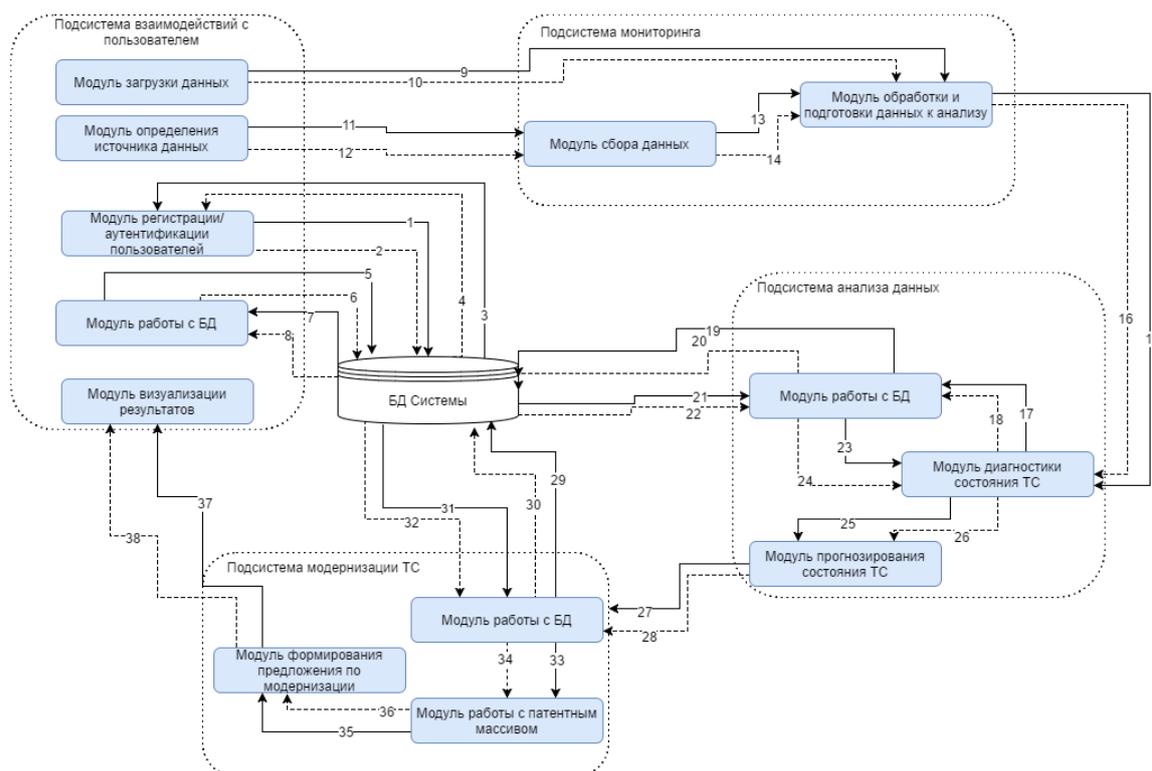


Рисунок 3 – Архитектура платформы

Связи структурных элементов платформы, указанные на Рисунке 3 числами:

- 1 – вызов базы данных системы;
- 2 – запрос к базе данных (получение, добавление, изменение или удаление данных о пользователе);
- 3 – вызов модуля регистрации/аутентификации пользователя;
- 4 – ответ на основе полученного запроса к базе данных;
- 5 – вызов базы данных системы;
- 6 – запрос к базе данных (получение, добавление, изменение или удаление данных о технической системе);
- 7 – вызов модуля работы с БД;
- 8 – ответ на основе полученного запроса к базе данных;
- 9 – вызов модуля обработки и подготовки данных к анализу;
- 10 – загруженные пользователем данные;
- 11 – вызов модуля сбора данных;
- 12 – информация об источнике данных (адрес сервера), тип получаемых данных, информация о технической системе, периодичность сбора данных;
- 13 – вызов модуля обработки и подготовки данных к анализу;
- 14 – полученные данные с сервера;
- 15 – вызов модуля диагностики состояния ТС;

- 16 – обработанные данные о функционировании технической системы;
- 17 – вызов модуля работы с БД;
- 18 – информация о технической системе (название ТС);
- 19 – вызов базы данных системы;
- 20 – запрос к базе данных на получение диапазонов значений для контролируемых параметров анализируемой системы;
- 21 – вызов модуля работы с БД;
- 22 – диапазоны значений для контролируемых параметров заданной технической системы;
- 23 – вызов модуля диагностики состояния ТС;
- 24 – диапазоны значений для контролируемых параметров заданной технической системы;
- 25 – вызов модуля прогнозирования состояния ТС;
- 26 – информация о диагностируемом состоянии ТС;
- 27 – вызов модуля работы с БД;
- 28 – информация о диагностируемом и прогнозируемом состоянии ТС;
- 29 – вызов базы данных системы;
- 30 – запрос о получении прецедентов модернизации анализируемой технической системы;
- 31 – вызов модуля работы с БД;
- 32 – данные о прецедентах модернизации анализируемой технической системы;
- 33 – вызов модуля работы с патентным массивом;
- 34 – данные о прецедентах модернизации, а также информация о диагностируемом и прогнозируемом состоянии анализируемой технической системы;
- 35 – вызов модуля формирования предложения по модернизации
- 36 – информация о найденных патентах, связанными с данной технической системой, данные о прецедентах модернизации, а также информация о диагностируемом и прогнозируемом состоянии анализируемой технической системы;
- 37 – вызов модуля визуализации результатов;
- 38 – предложение по модернизации, а также информация о диагностируемом и прогнозируемом состоянии анализируемой технической системы.

Заключение

В ходе исследования были получены новые научные и практические результаты. Формализованы основные процедуры модернизации технической системы и выбраны методы решения и модели представления знаний для повышения эффективности при выполнении процедур.

Разработан метод модернизации технической системы, с использованием вывода на прецедентах. Для решения задачи модернизации впервые разработан комплекс моделей, методов и алгоритмов позволяющий проводить модернизацию технической системы с учетом ее функционально-параметрической и структурно-параметрической схемы на различной стадии жизненного цикла.

Разработаны системы интеллектуальной платформы мониторинга, диагностики и модернизации технических систем на различных стадиях жизненного цикла. Произведена апробация интеллектуальной платформы мониторинга, диагностики и модернизации технических систем. Полученные результаты применены в предметных областях управления эксплуатацией и модернизацией распределенных систем, общепромышленного оборудования, транспортных машин, а также других, для использования в коммерческих и региональных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Predictive Modeling as A Basis for Monitoring, Diagnosis, Forecasting and Upgrading of a Technical System / А.В. Матохина, А.В. Кизим, В.В. Пантелеев, Н.А. Никитин, С.Е. Драгунов // 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies – AICT`2017 (Moscow, Russia, 20-22 September, 2017) : Conference Proceedings. Vol. 2 / V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Russian Foundation for Basic Research (project № 17-08-20518) [et al.]. - Moscow, 2017. - С. 480-484.
2. Kizim, A., Development of Ontological Knowledge Representation Model of Industrial Equipment / A. Kizim, A. Matokhina, B. Nesterov // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science: First Conference, CIT&DS 2015 Volgograd, Russia, September 15–17, 2015 Proceedings – С. 355–367.
3. Кизим, А.В. The developing of the maintenance and repair body of knowledge to increasing equipment maintenance and repair organization efficiency / А.В. Кизим // Information Resources Management Journal. - 2016. - Vol. 29, No. 4. - С. 49-64.
4. Kizim, AV. Expert Diagnostic System Maintenance of Complex Equipment in the Life Cycle / Kizim, AV.; Matokhina, A. V.; Kamaev, V. A.; и др.// International Journal Of Advanced Biotechnology And Research. - № 7 (2).- С. 710-716
5. Автоматизация системы управления техническим обслуживанием группового объекта/ М.И. Яцечко, С.В. Ипполитов, Р.В. Репин, В.А.

- Малышев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал, Том 7, № 1, 2019 г. doi: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.041
6. Koitz R., Wotawa F. Diagnosis of technical systems / R. Koitz, F. Wotawa // Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence. – 2015. – P. 4375-4376.
 7. Программно-аппаратный комплекс диагностики неисправностей чиллеров / А.В. Кизим, М.А. Чернецкий, А.В. Матохина, С.Е. Ползунов // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2015. - № 14 (178). - С. 116-122.
 8. Kizim, AV. Intelligent Platform of Monitoring, Diagnosis and Modernization of Technical Systems at Various Stages of Life Cycle / Kizim, AV., Matokhina A.V., Vayngolts I.I. and Shcherbakov M.V. // Proceedings of the 5th International Conference on System Modeling Advancement in Research Trends (25th - 27th November 2016). - С. 145-150.
 9. Campos J. An ontology for asset management. IFAC Conference on Cost Effective Automation in Networked. - 2007.
 10. Щербачков, М.В. A Method and IR4I Index Indicating the Readiness of Business Processes for Data Science Solutions / М.В. Щербачков, Р.Р. Groumpos, А.Г. Кравец // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT&DS 2017 (Volgograd, Russia, September 12-14, 2017) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Peter Groumpos ; Volgograd State Technical University [et al.]. – [Germany] : Springer International Publishing AG, 2017. – P. 21-34. – (Ser. Communications in Computer and Information Science; Vol. 754).
 11. Lvovich I.Y. et al. Production process control subsystem for manufacture of integrated circuits / Lvovich I.Y., Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy A.P., Saleev D.V., Choporov O.N. // Measurement Techniques. 2017. Т. 60. № 6. С. 529-533.
 12. Дравица Виктор, Курбацкий Александр Промышленная революция Industry 4. 0 // Наука и инновации. 2016. №157
 13. Ящур А. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования. – Litres, 2018.
 14. Baidya R. et al. Strategic maintenance technique selection using combined quality function deployment, the analytic hierarchy process and the benefit of doubt approach //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 94. – №. 1-4. – С. 31-44.

15. Keskin F. D. et al. An Assessment Model for Organizational Adoption of Industry 4.0 Based on Multi-criteria Decision Techniques //The International Symposium for Production Research. – Springer, Cham, 2018. – С. 85-100.

A.V. Kizim¹, A.V. Matokhina¹, A.G. Kravets¹, I.P. Medintseva²

**SOFTWARE FOR TECHNICAL SYSTEMS MODERNIZATION
SUPPORT**

*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
Volgograd Institute of Management – branch of the Russian Presidential
Academy of National Economy and Public Administration*

The paper describes the development of a system for representing knowledge about equipment as a technical system that combines models for representing knowledge about the structure, parameters, and functioning of the system. The architecture of the intellectual platform of monitoring, diagnostics, and modernization of technical systems at various stages of the life cycle is shown. The developed subsystems make it possible to analyze the current state of the technical system, predict subsequent states, carry out fault diagnostics and propose modernization options, taking into account the goals set, or based on the results of the analysis of the technical characteristics of the system. The classification of the main goals of equipment modernization is given. A description of the method of upgrading equipment for monitoring purposes, as the final product, and process equipment. The ontology of common industrial equipment is presented, including the classes necessary for building equipment modernization precedents, taking into account the goal of modernization. The proposed ontology includes a detailed presentation of data and knowledge on the main types of common industrial equipment, as well as diagnostic rules for troubleshooting certain types of equipment. A formal description of equipment modernization precedents is proposed. It shows the relevance of development for modern industrial enterprises, as part of the national program and the concept of modern production. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research project No. 19-07-01200.

Keywords: ontological engineering, production modernization, maintenance and repair, life cycle.

REFERENCES

1. Predictive Modeling as A Basis for Monitoring, Diagnosis, Forecasting and Technical Systems. Matokhina, A.V. Kizim, V.V. Panteleev, N.A. Nikitin, S.E. Dragunov // 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies - AICT 2017 (Moscow, Russia, September 20-22, 2017): Conference Proceedings. Vol. 2 / V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Russian Foundation for Basic Research (project No. 17-08-20518) [et al.]. - Moscow, 2017. - p. 480-484.

2. Kizim, A., A. Kokim, A. Matokhina, B. Nesterov, Development of the Optical Methodology // Creativity in Intelligent Technologies and Volunteers, 2015, Volgograd, Russia, September 15 17, 2015 Proceedings - p. 355–367.
3. Kizim, A.V. Increase-ciency / A.V. Kizim // Information Resources Management Journal. - 2016. - Vol. 29, No. 4. - C. 49-64.
4. Kizim, AV. Expert Diagnostic System Maintenance of Complexes in the Life Cycle / Kizim, AV.; Matokhina, A. V .; Kamaev, V. A .; et al. // International Journal Of Advanced Biotechnology And Research. No. 7 (2) .- p. 710-716
5. Automation of the maintenance management system for a group object / M.I. Yatsechko, S.V. Ippolitov, R.V. Repin, V.A. Malyshev // Modeling, optimization and information technology. Scientific Journal, Volume 7, No. 1, 2019. doi: 10.26102 / 2310-6018 / 2019.24.1.041
6. Koitz R., Wotawa F. Diagnosis of technical systems / R. Koitz, F. Wotawa // Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence. - 2015. - P. 4375-4376.
7. Hardware-software complex for diagnostics of chiller faults / A.V. Kizim, M.A. Chernetsky, A.V. Matokhina, S.E. Polzunov // News of VolgGTU. Ser. Actual problems of management, computing and computer science in technical systems. - Volgograd, 2015. - № 14 (178). - C. 116-122.
8. Kizim, AV. Intelligent Platform for Monitoring and Diagnostic Systems for Various Systems / Kizim, AV., Matokhina A.V., Vayngolts I.I. and Shcherbakov M.V. // Proceedings of the 5th International Conference on System Modeling Advancement in Research Trends (25th - 27th November, 2016). - p. 145-150.
9. Campos J. An ontology for asset management. IFAC Conference on Cost Effective Automation in Networked. - 2007.
10. Shcherbakov, M.V. A Method and IR4I Index Indicating the Business Processes for Data Science Solutions / M.V. Shcherbakov, P.P. Groumpos, A.G. Kravets // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT & DS 2017 (Volgograd, Russia, September 12-14, 2017): Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Peter Groumpos; Volgograd State Technical University [et al.]. - [Germany]: Springer International Publishing AG, 2017. - P. 21-34. - (Ser. Communications in Computer and Information Science; Vol. 754).
11. Lvovich I.Y. et al. Production process control subsystem for manufacture of integrated circuits / Lvovich I.Y., Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy A.P., Saleev D.V., Choporov O.N. // Measurement Techniques. 2017. T. 60. № 6. C. 529-533.

12. Viktor Dravitsa, Alexander Kurbatsky Industrial Revolution Industry 4. 0 // Science and Innovations. 2016. №157
13. Foot and mouth disease A. System of maintenance and repair of general industrial equipment. - Liters, 2018.
14. Baidya R. et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2018. - Т. 94. - №. 1-4. - p. 31-44.
15. Keskin F. D. et al. Decision Techniques An Assessment Model for Organizational Adoption of Industry 4.0 Based on Multi-Criteria // The International Symposium for Production Research. - Springer, Cham, 2018. - p. 85-100.