

Архитектура системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического оборудования

В.А. Емельянов
С.Г. Черный
Н.Ю. Емельянова

Ссылка для цитирования

Емельянов В.А., Черный С.Г., Емельянова Н.Ю. Архитектура системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического оборудования // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 451–458. doi: 10.15827/0236-235X.142.451-458

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.01.2023

После доработки: 24.03.2023

Принята к публикации: 28.03.2023

Аннотация. В работе решается прикладная задача совершенствования существующей системы диагностики критического футерованного оборудования без его вывода из эксплуатации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения уровня автоматизации и объективности принятия решений при эксплуатации этого оборудования для предотвращения аварийных ситуаций на производстве. Целью являются проектирование архитектуры и разработка системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования. Для высокоуровневого проектирования архитектуры данной системы использован язык моделирования архитектуры ArchiMate. Для проектирования статической структуры системы в виде основных сущностей, реализующих функционал системы по поддержке принятия решений о допустимости использования критического футерованного оборудования, применены объектно-ориентированный подход (включая объектно-ориентированный анализ, объектно-ориентированное проектирование и программирование) и унифицированный язык моделирования UML. В ходе работы построена модель верхнеуровневой архитектуры системы поддержки принятия решений при мониторинге технического состояния критического футерованного оборудования. Выполнен анализ функционала, проведено объектно-ориентированное проектирование статической структуры системы поддержки принятия решений. Разработано ПО системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования, позволяющее генерировать рекомендации относительно режимов его эксплуатации и осуществлять профилактическую диагностику данного оборудования. Разработанное ПО протестировано в условиях металлургического производства в технологическом процессе диагностики передвижных миксеров ПМ350 на Алчевском металлургическом комбинате.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, архитектура, объектная модель, ПО, футерованное оборудование

Критически важным для металлургических и машиностроительных предприятий является футерованное оборудование, такое как стационарные и передвижные миксеры, сталеразливочные ковши. От его мониторинга и своевременной диагностики во многом зависит способность предприятия предотвращать аварии и обеспечивать непрерывность технологического процесса выпуска металлов. Этим и обусловлена необходимость разработки и совершенствования систем диагностики футерованного оборудования.

Анализ источников и постановка задачи

В работах [1, 2] наглядно продемонстрировано выполнение диагностики и мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования с помощью средств, функционирующие которых характеризуется недопустимым уровнем погрешности измерения. В настоящее время существует большое разнообразие подходов и систем [3–5] в обла-

сти автоматизации контроля технического состояния такого футерованного оборудования, как сталь-ковши. В работе [6] предлагается система диагностики футеровки сталь-ковша на основе инфракрасной термометрии. Авторы исследования [7] представляют лазерный измеритель и термографию в сталеразливочном ковше в качестве методов оценки, внедренных в Nippon Steel Corporation. В [8] предложена система диагностики сталь-ковша на основе программной платформы LabVIEW, позволяющая осуществлять мониторинг состояния рабочего слоя внутренней поверхности ковша. Все эти работы направлены на решение общей проблемы при эксплуатации футерованного оборудования, заключающейся в низком уровне автоматизации диагностики и контроля состояния оборудования, о чем также свидетельствуют исследования [9, 10]. Анализ приведенных источников позволяет сделать вывод о том, что существующие модели, методы и системы не позволяют выполнять диагностику и мониторинг футерованного оборудования без вы-

вода его из штатного режима работы, то есть в системах отсутствует возможность профилактической диагностики. Во многих системах диагностики футерованного оборудования задача определения режима его эксплуатации возлагается на технолога, что в силу субъективного фактора и низкого уровня объективности принятия решений приводит к проблемным и аварийным ситуациям [11, 12]. Таким образом, возникает необходимость совершенствования существующих моделей и систем диагностики критического футерованного оборудования без его вывода из эксплуатации. Поэтому актуально проведение научных исследований, направленных на разработку систем и средств для автоматизации оценки технического состояния и поддержки принятия решений в процессе работы такого оборудования.

Проектирование архитектуры системы

В данном исследовании предлагается новая система, позволяющая осуществлять поддержку принятия решений о допустимости использования оборудования без вывода его из штатных режимов эксплуатации. Для разработки такой системы необходимо ее детальное проектирование.

Авторами выполнено высокоуровневое проектирование архитектуры системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования, которая представляет собой описание функциональных модулей и компонент ПО системы, а также связей между ними. Проектируемая система основана на разработанном ранее подходе и методах автоматизированной диагностики из работы [13]. Реализация методов дает возможность системе осуществлять поддержку принятия решений о допустимости использования футерованного оборудования без вывода его из штатных режимов эксплуатации.

Для отражения архитектуры системы построены следующие модели:

- модель использования системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования в виде диаграммы вариантов использования;
- концептуальная модель для отражения статической структуры системы в виде основных сущностей, на которые возлагается реализация функциональности системы;
- верхнеуровневая модель архитектуры системы поддержки принятия решений в про-

цессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования.

Проектирование функционала системы поддержки принятия решений выполнено с помощью унифицированного языка UML в ПО StarUML. В процессе построено 11 диаграмм вариантов использования. Диаграмма, приведенная на рисунке 1, отражает обобщенную модель использования системы.

В модели выделены роль пользователя системы «Технолог» и шесть основных вариантов ее использования: «Формирование термограммы», «Распознавание термограмм», «Оценить состояние футеровки», «Сформировать рекомендации», «Оценить состояние корпуса», «Создать отчет». Варианты использования имеют свою декомпозицию и сценарии по каждой функции.

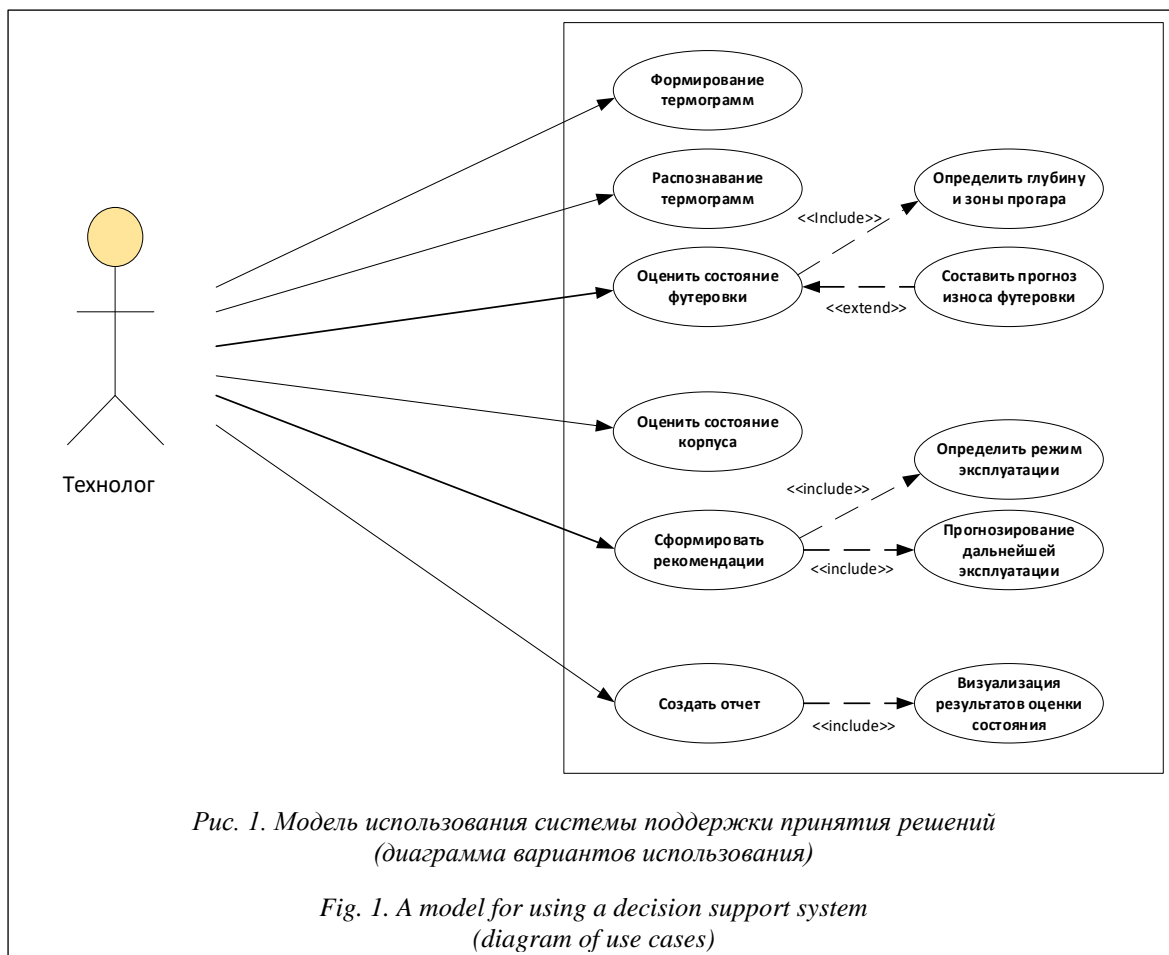
Для отображения статической структуры системы поддержки принятия решений построено восемь диаграмм классов этапа анализа, отражающих основные сущности (классы), на которые возлагается реализация функций системы поддержки принятия решений. Общая диаграмма классов приведена на рисунке 2.

На диаграмме классов системы поддержки принятия решений выделены описанные далее сущности.

В «Личном кабинете технолога» выполняются операции по регистрации нового пользователя-технолога и по входу в личный кабинет уже существующего.

«Конфигуратор» содержит операции для конфигурирования исследования критического футерованного оборудования: `ImportDiagnosingTask()` загружает в систему поддержки принятия решений исходные данные по проводимому анализу критического футерованного оборудования (цех, описание оборудования, номер и т.д.); `CreateDiagnosingReport()` реализует функцию создания отчета о проведенном исследовании критического футерованного оборудования; `SendReport()` реализует функцию «Отправить результаты в цех»; `ChangeAnalyseSettings()` изменяет параметры проводимого исследования (например, добавить оценку свойств металла и др. настройки); `ChooseConfiguration()` позволяет выбрать один из предустановленных профилей диагностики критического футерованного оборудования.

«Модуль оценки технического состояния» содержит операции для оценки износа футеровки и технического состояния корпуса футерованного оборудования: `GetBurnOutZones()` определяет глубину и зоны прогара футеровки;



LiningPrediction() составляет прогноз износа футеровки; LiningAssesment() оценивает состояние футеровки; MetalAssesment() оценивает состояние корпуса.

В составе «Анализатора термограмм» операции для обработки изображений термограмм критического футерованного оборудования. Он позволяет выполнять набор функций, связанных с вариантом использования «Распознавание термограмм». LoadThermogram() осуществляет загрузку сформированного изображения термограммы критического футерованного оборудования. Для выполнения операций по предварительной обработке изображения термограммы критического футерованного оборудования используются операции BinarizeImage(), Filtration(), Vectorization, предназначенные для бинаризации, фильтрации (разными методами) и векторизации изображения соответственно. Для распознавания термограммы критического футерованного оборудования используется операция RecognizeThermogram(). Сохранение обработанного изображения с вектором числовых характеристик этого изображения реализуется операцией SaveResult().

Поскольку для оценки футеровки критического футерованного оборудования система поддержки принятия решений предполагает использовать нейронные сети, в модели выделена сущность «Нейронная сеть», которая содержит атрибуты и операции для создания и обучения нейронных сетей.

«Модуль ППР» содержит операции для формирования рекомендаций относительно исследуемого критического футерованного оборудования: GetOperationMode() определяет наиболее рациональный режим эксплуатации критического футерованного оборудования; SavePrecedent() сохраняет в базу прецедентов новый прецедент, для которого не был найден подобный прецедент в базе; CreateRecomendations() генерирует для технолога рекомендации о дальнейшем использовании критического футерованного оборудования; SaveKnowledge() сохраняет новые знания в предметной области, которые могут появляться в процессе исследования; ChangeExpertSettings() изменяет настройки модуля поддержки принятия решений.

На рисунке 3 представлена верхнеуровневая модель архитектуры системы поддержки

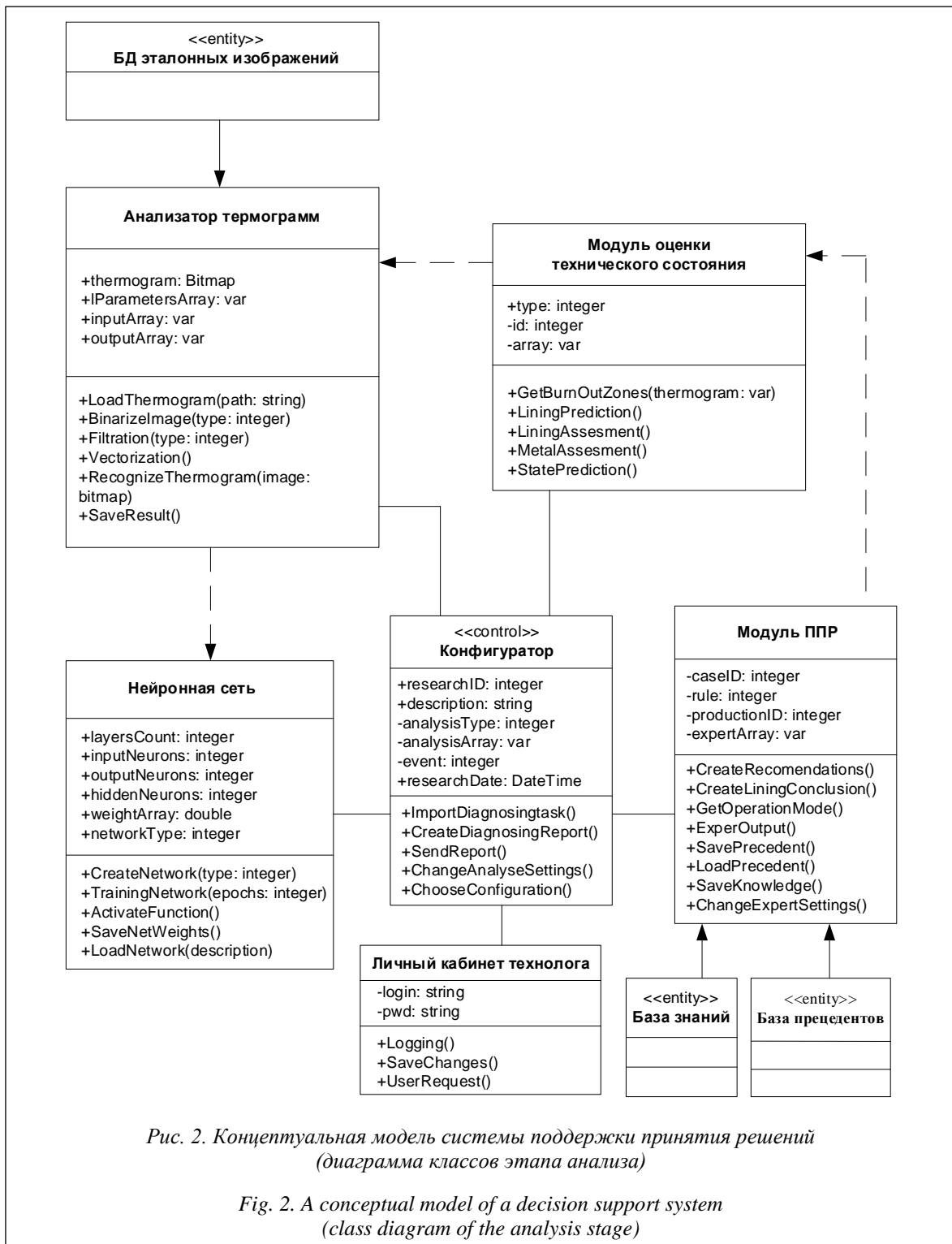


Рис. 2. Концептуальная модель системы поддержки принятия решений (диаграмма классов этапа анализа)

Fig. 2. A conceptual model of a decision support system (class diagram of the analysis stage)

принятия решений, выполненная в программном средстве Archi на языке моделирования ArchiMate.

В архитектуре системы поддержки принятия решений были выделены модули:

- обработки термограмм футерованного оборудования;

- оценки технического состояния футерованного оборудования;
- поддержки принятия решений;
- нейронных сетей;
- управления.

Пользователю системы (технологу) доступны следующие сервисы приложений:

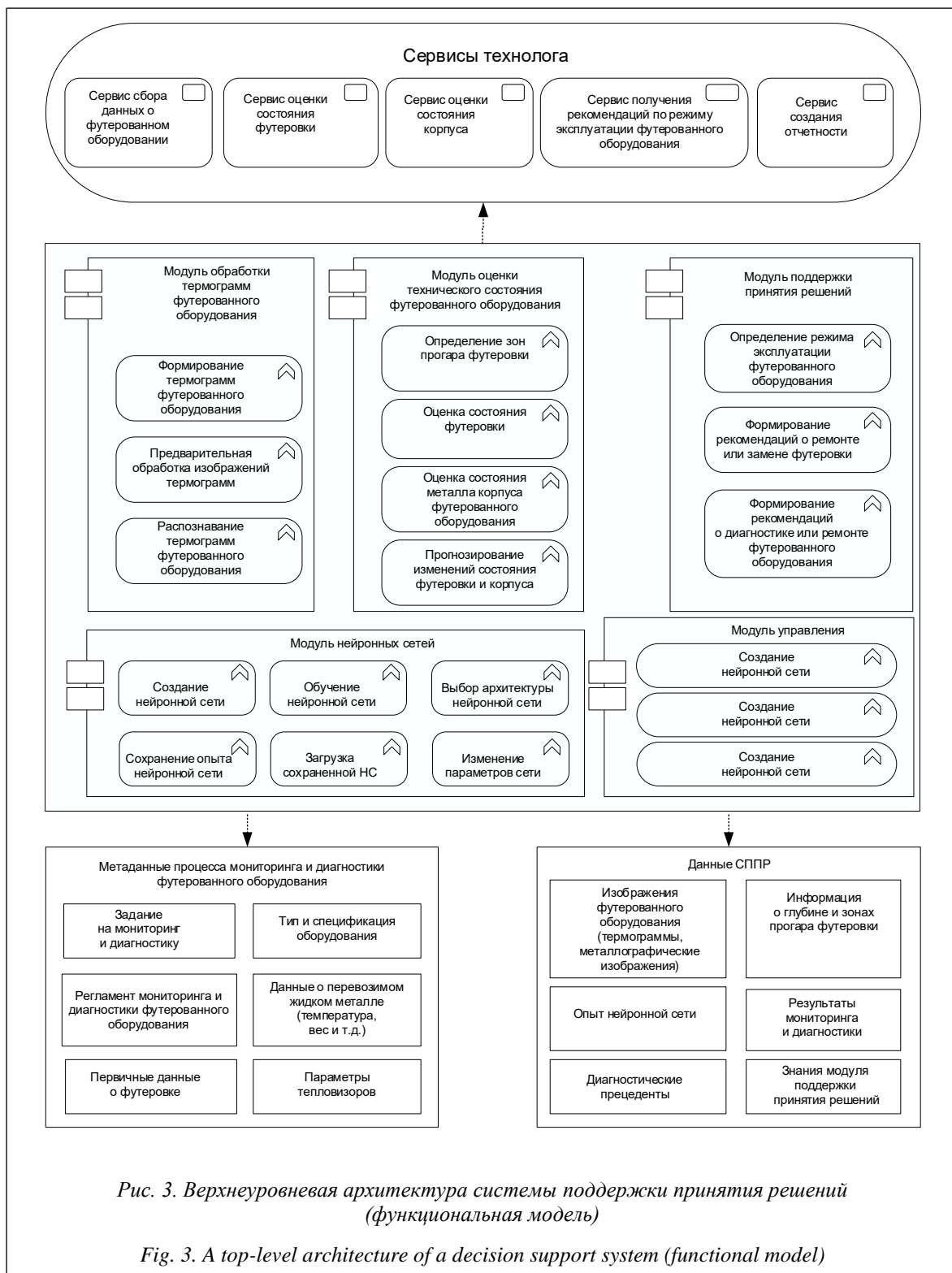


Рис. 3. Верхнеуровневая архитектура системы поддержки принятия решений (функциональная модель)

Fig. 3. A top-level architecture of a decision support system (functional model)

- сбор данных о футерованном оборудовании;
- оценка состояния футеровки;
- оценка состояния корпуса;
- получение рекомендаций по режиму эксплуатации футерованного оборудования;
- создание отчетности.

В процессе проектирования выделены отдельные категории метаданных, которые будут использоваться системой поддержки принятия решений. К основным данным отнесены:

- документ-задание на мониторинг и диагностику футерованного оборудования;

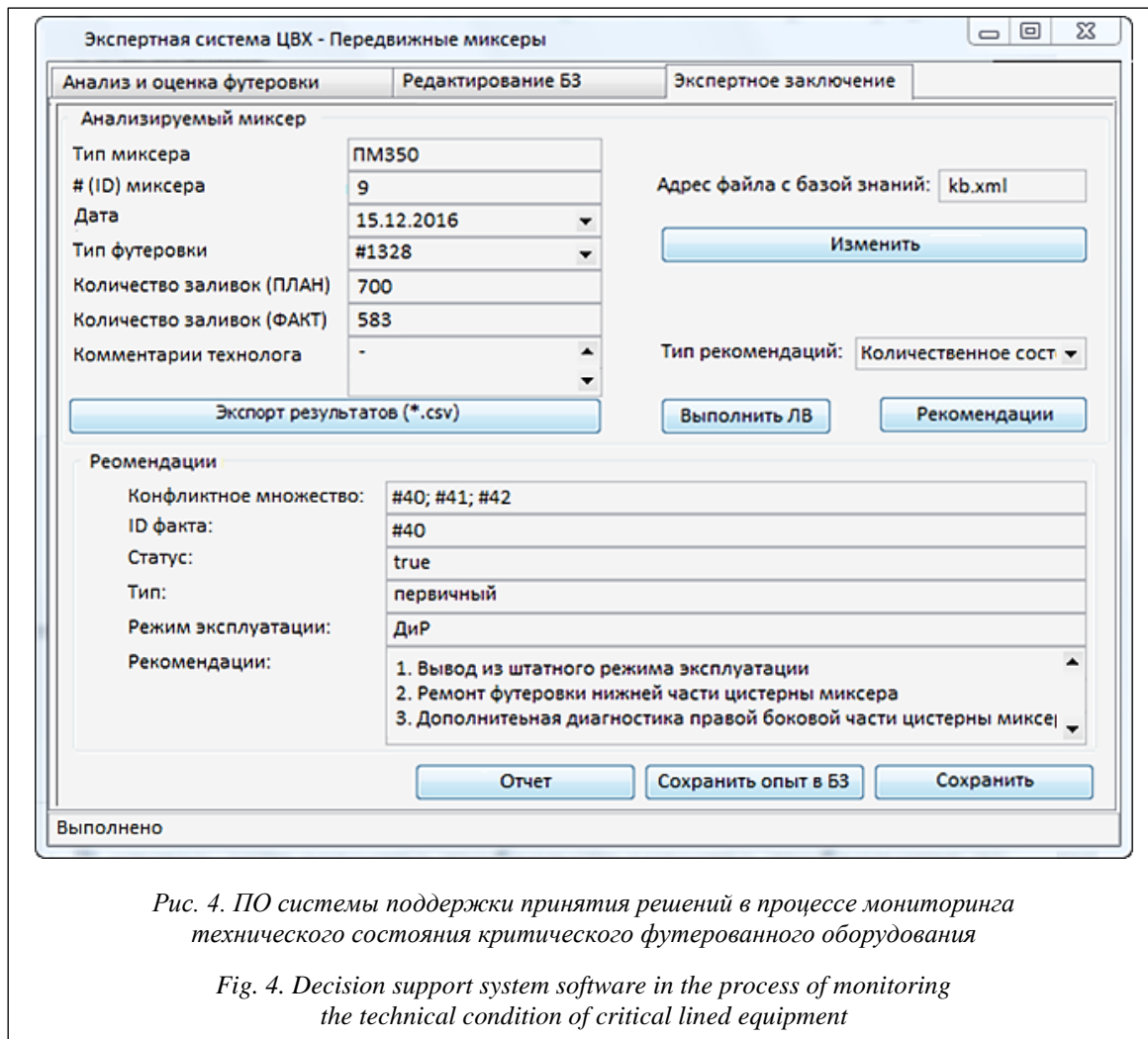


Рис. 4. ПО системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования

Fig. 4. Decision support system software in the process of monitoring the technical condition of critical lined equipment

- тип и спецификация футерованного оборудования;
- регламент мониторинга и диагностики футерованного оборудования;
- данные о перевозимом в футерованном оборудовании жидком металле (температура металла, вес жидкого металла и др.);
- параметры тепловизоров, с помощью которых формируются термограммы футерованного оборудования;
- первичные данные о футеровке (материал, состав и др.).

Разработка ПО системы

Созданное ПО системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования (рис. 4) функционирует в двух режимах: анализа и обучения.

Разработанное ПО успешно апробировано на Алчевском металлургическом комбинате

для диагностики передвижных миксеров типа ПМ350.

Выводы

В ходе исследования создана модель верхнеуровневой архитектуры системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга технического состояния критического футерованного оборудования. Отличительной особенностью данной системы является возможность поддержки принятия решений о допустимости использования футерованного оборудования без вывода его из штатных режимов эксплуатации, которая достигается благодаря реализации разработанных методов автоматизированной диагностики, основанных на использовании нейронных сетей и теории прецедентов для диагностики технического состояния футерованного оборудования.

На основе модели разработано ПО для распознавания изображений термограмм критиче-

ского футерованного оборудования, которое позволяет автоматически определять режим эксплуатации оборудования и генерировать для технолога рекомендации относительно технического состояния футеровки и вида ремонта критического футерованного оборудования.

Список литературы

1. Jančar D., Machů M., Velička M., Tvardek P., Kocián L., Vlček J. Use of neural networks for lifetime analysis of teeming ladles. *Materials*, 2022, vol. 15, art. 8234. doi: 10.3390/ma15228234.
2. Branca T.A., Fornai B., Colla V., Murri M.M., Strella E., Schröder A.J. The challenge of digitalization in the steel sector. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 2, art. 288. doi: 10.3390/met10020288.
3. Chakraborty B., Sinha B. Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging – a robust approach to avoid ladle breakout. *QIRT*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 169–191. doi: 10.1080/17686733.2019.1639112.
4. Li G., Jiang D., Sun Y., Jiang G., Tao B. Life prediction mechanism of ladle composite structure body based on simulation technology. *Arch. Metall. Mater.*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 1555–1562.
5. Vannucci M., Colla V., Chini M., Gaspardo D., Palm B. Artificial intelligence approaches for the ladle predictive maintenance in electric steel plant. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no. 2, pp. 331–336. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.215.
6. Lee S.J., Jeon Y.J., Kim S.W. Analyzing refractory bricks of ladles using infrared images. *J. ICROS*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 291–300. doi: 10.5302/j.icros.2015.14.8036.
7. Sawai S., Shiokawa M., Hashimoto K., Yamada Y. Methods of evaluating the damage of steelmaking refractories. *Nippon Steel Tech. Report*, 2020, no. 125, pp. 81–86.
8. Chang W., Sun Y., Li G., Jiang G., Kong J., Jiang D., Liu H. Ladle health monitoring system based on LabVIEW. *IJCSM*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 566–576. doi: 10.1504/IJCSM.2018.096311.
9. Mihailov E., Petkov V., Doichev I., Boshnakov K. Model-based approach for investigation of ladle lining damages. *IREME*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 122–130.
10. Lamm R., Kirchhoff S. Optimization of ladle refractory lining, gap and crack detection, lining surface temperature and sand-filling of the ladle-tap hole by means of a 3d-laserprofile-measurement system that is immersed into a hot ladle to evaluate the entire condition. *Proc. UNITECR*, 2017. URL: http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper_rbofbhfcxshpgipoispm.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
11. Colpaert H. *Metallography of Steels: Interpretation of Structure and the Effects of Processing*. USA, ASM Int. Publ., 2018, 699 p. doi: 10.31399/asm.tb.msisep.9781627082594.
12. Martyushev N., Skeebe V. The method of quantitative automatic metallographic analysis. *JPCS*, 2017, vol. 803, art. 012094. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
13. Chernyi S., Yemelyanov V., Zinchenko E., Zinchenko A., Tsvetkova O., Mishin A. Application of artificial intelligence technologies for diagnostics of production structures. *JMSE*, 2022, vol. 10, no. 2, art. 259. doi: 10.3390/jmse10020259.

An architecture of the decision support system for monitoring a technical condition of critical equipment

Vitaliy A. Yemelyanov
Sergei G. Chernyi
Nataliya Yu. Yemelyanova

For citation

Yemelyanov, V.A., Chernyi, S.G., Yemelyanova, N.Yu. (2023) 'An architecture of the decision support system for monitoring a technical condition of critical equipment', *Software & Systems*, 36(3), pp. 451–458 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.451-458

Article info

Received: 30.01.2023

After revision: 24.03.2023

Accepted: 28.03.2023

Abstract. The paper solves an applied problem of improving the existing system for diagnosing critical lined equipment without its decommissioning. The relevance of the work is due to the need to increase the level of automation and objectivity of decision-making during operation of critical lined equipment to prevent accidents in production. The purpose of the study is designing the architecture of a decision support system for monitoring the technical condition of critical lined equipment. As for research methods, for high-level architecture design of the decision support system in the process of monitoring the technical condition of critical lined equipment, we used the architecture modeling language ArchiMate. An object-oriented approach (including object-oriented analysis, object-oriented design and programming) and the unified modelling language UML were used to design the static system structure in the form of the main entities that are responsible for implementing the system functionality to support decision making on the admissibility of using critical lined equipment.

As a result, there is a developed model of the top-level architecture of the decision support system for monitoring the technical condition of critical lined equipment. The developed software for a decision support system for monitoring the technical condition of critical lined equipment makes it possible to generate recommendations regarding the operating modes of critical lined equipment. The developed software was tested in the conditions of metallurgical production in the technological process of diagnosing mobile mixers PM350 at the Alchevsk Iron and Steel Works.

Keywords: decision support system, architecture, object model, lined equipment, software

Reference List

1. Jančar, D., Machů, M., Velička, M., Tvardek, P., Kocián, L., Vlček, J. (2022) 'Use of neural networks for lifetime analysis of teeming ladles', *Materials*, 15, art. 8234. doi: 10.3390/ma15228234.
2. Branca, T.A., Fornai, B., Colla, V., Murri, M.M., Streppa, E., Schröder, A.J. (2020) 'The challenge of digitalization in the steel sector', *Metals*, 10(2), art. 288. doi: 10.3390/met10020288.
3. Chakraborty, B., Sinha, B. (2019) 'Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging – a robust approach to avoid ladle breakout', *QIRT*, 17(3), pp. 169–191. doi: 10.1080/17686733.2019.1639112.
4. Li, G., Jiang, D., Sun, Y., Jiang, G., Tao, B. (2019) 'Life prediction mechanism of ladle composite structure body based on simulation technology', *Arch. Metall. Mater.*, 64(4), pp. 1555–1562.
5. Vannucci, M., Colla, V., Chini, M., Gaspario, D., Palm, B. (2022) 'Artificial intelligence approaches for the ladle predictive maintenance in electric steel plant', *IFAC-PapersOnLine*, 55(2), pp. 331–336. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.215.
6. Lee, S.J., Jeon, Y.J., Kim, S.W. (2015) 'Analyzing refractory bricks of ladles using infrared images', *J. ICROS*, 21(4), pp. 291–300. doi: 10.5302/j.icros.2015.14.8036.
7. Sawai, S., Shiokawa, M., Hashimoto, K., Yamada, Y. (2020) 'Methods of evaluating the damage of steelmaking refractories', *Nippon Steel Tech. Report*, (125), pp. 81–86.
8. Chang, W., Sun, Y., Li, G., Jiang, G., Kong, J., Jiang, D., Liu, H. (2018) 'Ladle health monitoring system based on LabVIEW', *IJCSM*, 9(6), pp. 566–576. doi: 10.1504/IJCSM.2018.096311.
9. Mikhailov, E., Petkov, V., Doichev, I., Boshnakov, K. (2013) 'Model-based approach for investigation of ladle lining damages', *IREME*, 7(2), pp. 122–130.
10. Lamm, R., Kirchhoff, S. (2017) 'Optimization of ladle refractory lining, gap and crack detection, lining surface temperature and sand-filling of the ladle-tap hole by means of a 3d-laserprofile-measurement system that is immersed into a hot ladle to evaluate the entire condition', *Proc. UNITECR*, available at: http://www.unitecr2017.mundodecongressos.com/abstracts/Paper_rbofbhfxcsxhpgipoispm.pdf (accessed October 10, 2022).
11. Colpaert, H. (2018) *Metallography of Steels: Interpretation of Structure and the Effects of Processing*. USA: ASM Int. Publ., 699 p. doi: 10.31399/asm.tb.msisep.9781627082594.
12. Martyshev, N., Skeeba, V. (2017) 'The method of quantitative automatic metallographic analysis', *JPCS*, 803, art. 012094. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012094.
13. Chernyi, S., Emelianov, V., Zinchenko, E., Zinchenko, A., Tsvetkova, O., Mishin, A. (2022) 'Application of artificial intelligence technologies for diagnostics of production structures', *JMSE*, 10(2), art. 259. doi: 10.3390/jmse10020259.

Авторы

Емельянов Виталий Александрович¹,
д.т.н., профессор, v.yemelyanov@gmail.com
Черный Сергей Григорьевич^{2,3}, к.т.н., доцент,
зав. кафедрой, научный сотрудник,
sergiiblack@gmail.com
Емельянова Наталия Юрьевна¹, к.т.н., доцент,
n.yemelianova@gmail.com

¹ Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации,
г. Москва, 125167, Россия

² Керченский государственный
морской технологический университет,
г. Керчь, 298300, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, 198035, Россия

Authors

Vitaliy A. Yemelyanov¹, Dr.Sc. (Engineering),
Professor, v.yemelyanov@gmail.com
Sergei G. Chernyi^{2,3}, Ph.D. (Engineering),
Associate Professor, Chief of Department,
Research Associate, sergiiblack@gmail.com
Nataliya Yu. Yemelyanova¹, Ph.D. (Engineering),
Associate Professor, n.yemelianova@gmail.com

¹ Financial University under the Government
of the Russian Federation,
Moscow, 125167, Russian Federation

² Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, 298300,
Russian Federation

³ St. Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, 198035,
Russian Federation