

## Повышение уровня автоматизации и объективности принятия решений в процессе транспортировки жидкого чугуна на производстве

В.А. Емельянов<sup>1</sup>, С.Г. Черный<sup>2,3</sup>✉, Н.Ю. Емельянова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, 125167, Россия

<sup>2</sup> Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, 298300, Россия

<sup>3</sup> Херсонский технический университет, г. Геническ, 275502, Россия

### Ссылка для цитирования

Емельянов В.А., Черный С.Г., Емельянова Н.Ю. Повышение уровня автоматизации и объективности принятия решений в процессе транспортировки жидкого чугуна на производстве // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 2. С. 282–288. doi: 10.15827/0236-235X.142.282-288

### Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.3

Поступила в редакцию: 29.09.2023

После доработки: 04.12.2023

Принята к публикации: 23.01.2024

**Аннотация.** Статья посвящена прикладной задаче разработки системы поддержки принятия решений для процесса транспортировки жидкого чугуна. Ее актуальность обусловлена необходимостью повышения уровня автоматизации и объективности принятия решений в данном процессе на производстве. При проектировании функциональной архитектуры системы использован язык моделирования ArchiMate. Для моделирования вариантов ее использования применены объектно-ориентированный подход (включая объектно-ориентированный анализ, объектно-ориентированное проектирование и программирование) и унифицированный язык моделирования UML. В ходе работы построена модель функциональной архитектуры системы поддержки принятия решений для процесса транспортировки жидкого чугуна. Выполнен анализ функционала и проведено объектно-ориентированное проектирование статической структуры системы. Разработано программное обеспечение, позволяющее вычислять вес чугуна на основе первичных данных с датчиков и осуществляющее поддержку принятия решений относительно ремонта и эксплуатации ковшей (чугуновозов). Предложенная модель функциональной архитектуры системы позволила разработать специализированное программное обеспечение для автоматизации процесса принятия решений относительно ремонта и эксплуатации ковшей. Разработанное программное обеспечение протестировано на данных об эксплуатации ковшей на металлургическом комбинате.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, программное обеспечение, архитектура, транспортировка чугуна, ковш

**Введение.** Одним из важных процессов при производстве металла является транспортировка жидкого чугуна из доменного цеха в конвертерный, которая осуществляется с помощью чугуновозных ковшей и чугуновозов. Его особенность заключается в необходимости отслеживания параметров процесса и объектов транспортировки (ковшей, жидкого чугуна) в режиме реального времени из-за термического воздействия жидкого чугуна и высоких механических нагрузок. В процессе транспортировки критически важными являются контроль и измерение температуры и веса жидкого чугуна, времени его транспортирования, так как задержки при перевозке могут напрямую повлиять на работу сталеразливочных машин. Процесс транспортировки предусматривает постоянный контроль за состоянием ковшей, включая диагностику их футеровки и определение наростов.

### Анализ источников

Для контроля и измерения параметров чугуна и ковшей (чугуновозов) существуют и

применяются разные автоматизированные системы [1–3]. Однако анализ источников показал, что контроль и измерение параметров жидкого чугуна и чугуновозов в таких системах зачастую реализуется средствами, обладающими высоким уровнем погрешности измерения [4–6]. В работе [7] описывается система оценки состояния футеровки ковшей на основе инфракрасной термометрии. В [8] предложена система контроля состояния ковша на основе LabVIEW, позволяющая отслеживать техническое состояние внутренней поверхности ковша. Обобщение результатов этих исследований позволяет сделать вывод о том, что все они направлены на повышение уровня автоматизации контроля состояния ковшей в процессе транспортировки жидкого чугуна. В работах [9, 10] отмечается, что, несмотря на существующую тенденцию к организации контроля состояния чугуна и ковшей с помощью автоматизированных систем, на практике такой контроль осуществляется технологом визуально, с ручным вводом данных о перевозках, что вносит субъективный фактор в данный процесс

и приводит к проблемным и аварийным ситуациям при транспортировке чугуна [11, 12]. Таким образом, научные исследования по автоматизации контроля и мониторинга процесса транспортировки жидкого чугуна по-прежнему актуальны.

### Проектирование системы поддержки принятия решений

Для автоматизации процесса транспортировки жидкого чугуна и поддержки принятия решений в процессе эксплуатации ковшей (чугуновозов) авторы предлагают новую систему, которая позволяет отслеживать параметры чугуна и ковша в режиме реального времени и осуществлять поддержку принятия решений о допустимости использования ковшей.

Выполнено проектирование архитектуры системы поддержки принятия решений (СППР) для процесса транспортировки жидкого чугуна. Проектируемая СППР программно реализует методы определения веса жидкого чугуна и диагностики футеровки критического футерованного оборудования, представленные в работах [13, 14]. Их программная реализация позволяет СППР осуществлять поддержку принятия решений о допустимости использования ковшей для транспортировки жидкого чугуна. Отличительной особенностью разработанного метода является определение веса жидкого чугуна с помощью многослойной нейронной сети, которая оценивает входные данные о весе чугуна, полученные тремя разными способами, что позволило снизить погрешность измерения веса жидкого чугуна [14].

В соответствии с разработанным методом для определения веса жидкого чугуна используется многослойная нейронная сеть, на вход которой поступают следующие параметры:

- значение начального веса миксера (ковша);
- вес передвижного миксера с жидким чугуном, определяемый с помощью тензодатчиков;
- вес порожнего миксера;
- интенсивность заливки чугуна в передвижной миксер;
- время начала заливки чугуна в передвижной миксер;
- время окончания заливки чугуна в передвижной миксер;
- плановый вес чугуна во время заливки;
- расчетный вес чугуна во время заливки;
- марка чугуна.

В скрытом слое нейронной сети происходит анализ этих входных данных о весе чугуна, полученных следующими способами:

– определение веса чугуна на основе данных тензодатчиков;

– определение веса на основе учета времени заливки жидкого чугуна в миксер;

– определение веса в зависимости от интенсивности заливки жидкого чугуна в миксер.

В выходном слое нейронной сети дается итоговая оценка значения веса жидкого чугуна.

Для исследования нейронной сети применялась среда MATLAB. В качестве тестовой выборки использована информация о 120 операциях взвешивания. Обучение нейронной сети осуществлялось по алгоритму обратного распространения ошибки с сигмоидальной функцией активации. Измерение качества распознавания выполнялось путем расчета среднеквадратической ошибки [14]. Для предотвращения процесса переобучения на основе графиков изменения ошибок было определено оптимальное значение числа эпох обучения, которое составило 380 эпох.

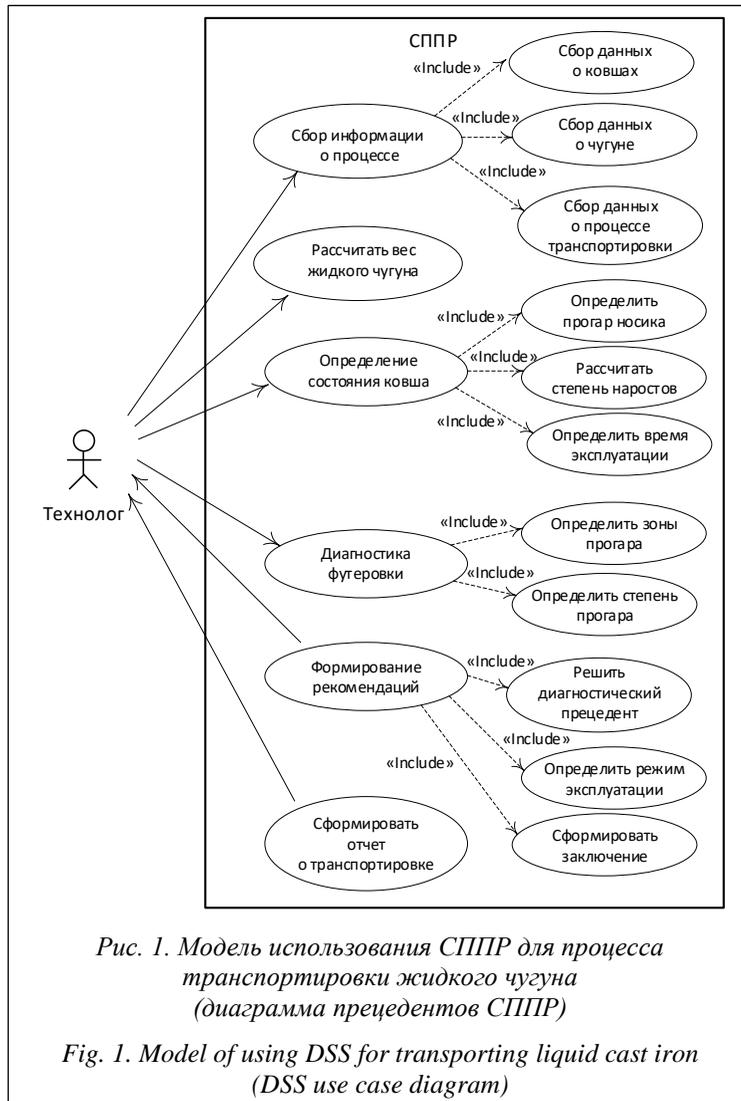
Проектирование функционала СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна выполнено с помощью унифицированного языка моделирования. Для отражения обобщенной модели использования СППР спроектирована диаграмма вариантов (рис. 1).

Модель использования СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна содержит шесть базовых вариантов.

1. Прецедент «Сбор информации о процессе». Эта функциональность СППР подразумевает сбор данных с датчиков, платформ и БД о ковшах, чугуне (температура, время заливки чугуна, вес чугуна и др.) и о самом процессе транспортировки (план-задание на транспортировку, эталонные значения параметров ковшей, чугуна, времени транспортировки и др.).

2. Прецедент «Рассчитать вес жидкого чугуна». В рамках данного варианта предполагается реализация разработанного авторами нейросетевого метода для вычисления массы транспортируемого жидкого чугуна. Вычисляется точное значение веса чугуна на основе обработки нейронной сетью данных о весе чугуна, полученных разными способами измерения (данные с тензодатчиков/весоизмерительной платформы, данные о весе чугуна, сформированные по времени и интенсивности его заливки в ковш) [14].

3. Прецедент «Определение состояния ковша». В ходе реализации данной функциональности выполняются сканирование ковша, вычисление степени наростов и степени прогара носика, визуализация результатов контроля со-



стояния ковша на рабочем месте технолога (диспетчера).

4. Прецедент «Диагностика футеровки». Предполагается реализация авторского метода автоматизированной диагностики футеровки на основе нейронной сети для выявления зон прогара футеровки. С этой целью устанавливается тепловизор для формирования термограмм ковша, распознавание которых осуществляется нейронной сетью. Распознавание термограмм и выявление зон прогара футеровки является основой для дальнейшей поддержки принятия решений о ремонте или эксплуатации ковшей.

5. Прецедент «Формирование рекомендаций». Данный вариант использования системы предполагает формирование рекомендаций по режиму эксплуатации ковшей на основе данных о выявленных зонах прогара футеровки, о наростах и весе перевезенного чугуна.

6. Прецедент «Сформировать отчет о транспортировке». Данная функциональность СППР позволяет формировать отчеты по процессу в соответствии с его технологической документацией.

На рисунке 2 представлена верхнеуровневая модель СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна, построенная с помощью ПО Archi на языке моделирования архитектуры ArchiMate и наглядно отображающая базовые компоненты системы.

При проектировании архитектуры СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна выделены категории метаданных, необходимых для ее функционирования. Основными являются следующие:

- документ-задание на транспортировку жидкого чугуна;
- тип и спецификация ковша;
- регламент (техническая документация) процесса транспортировки жидкого чугуна;
- данные о жидком чугуне (температура, вес, время нахождения в ковше и др.);
- параметры тепловизоров для формирования термограмм ковшей, необходимых для обнаружения зон прогара футеровки;
- первичные данные о футеровке (материал, состав и др.).

### Разработка ПО системы

На базе предложенной функциональной модели СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна создано ПО, реализующее функции системы, представленные на модели использования.

Ни рисунке 3 приведено окно для вычисления веса чугуна модуля определения веса жидкого чугуна. Функции данного модуля:

- сбор первичных данных о транспортируемом чугуне (данные с тензодатчиков/весоизмерительной платформы, данные о весе чугуна, сформированные по времени и интенсивности его заливки в ковш);
- вычисление веса жидкого чугуна на основе собранных первичных данных;

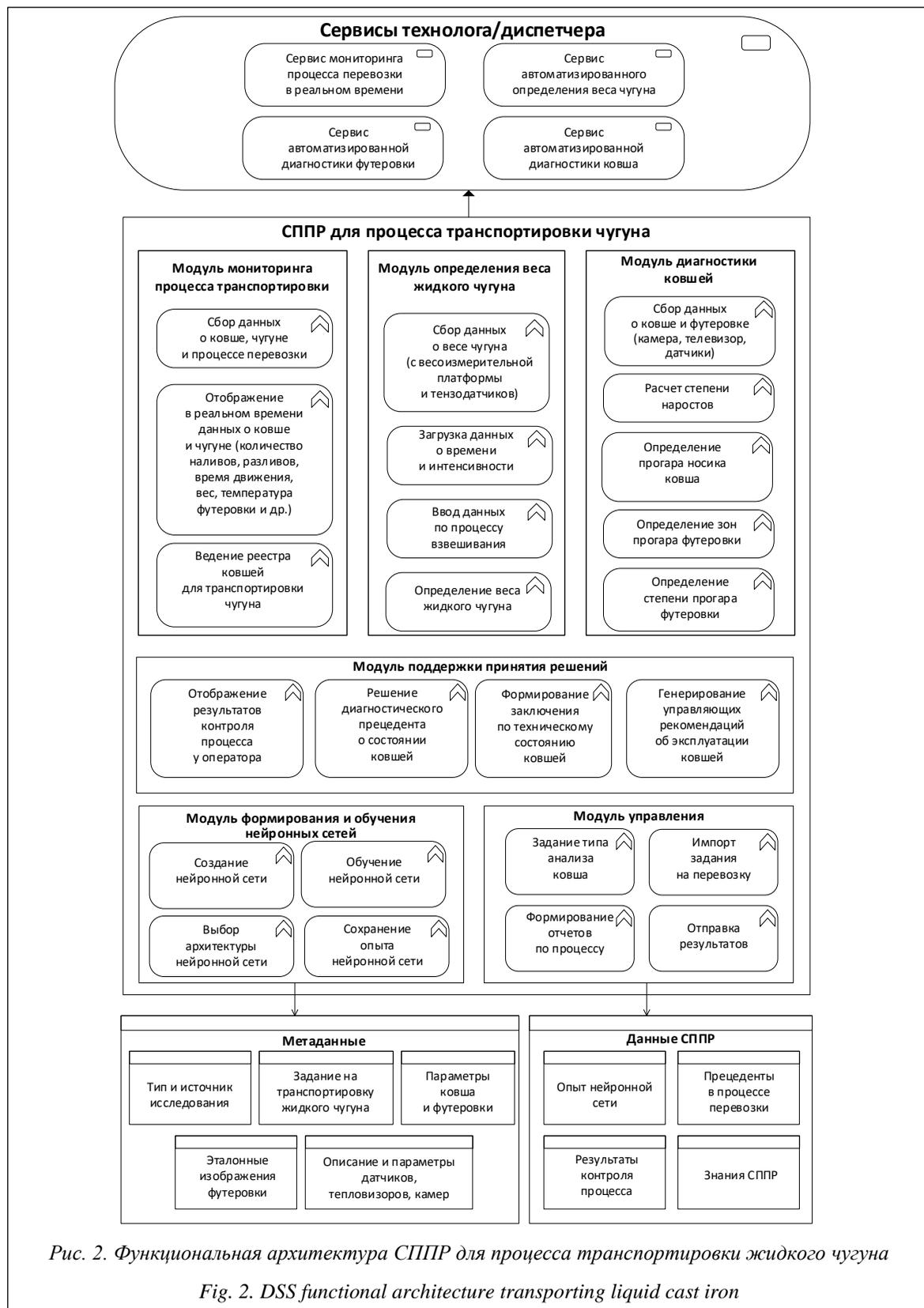


Рис. 2. Функциональная архитектура СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна

Fig. 2. DSS functional architecture transporting liquid cast iron

– визуализация значения веса жидкого чугуна у технолога/диспетчера и в конвертерном цеху;

– сохранение результатов определения веса для формирования БД и БЗ для обучения нейронной сети.



Модуль поддержки принятия решений о возможности эксплуатации ковшей (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2024-2/6.jpg>) выполняет следующие функции:

- формирование рекомендаций о режиме эксплуатации (ремонта) ковшей (чугуновозов);
- решение диагностических ситуаций с чугуновозами на основе накопленного опыта;
- сохранение нового диагностического опыта в БД;
- формирование отчетов по операциям диагностики технического состояния ковшей.

ного определения веса чугуна, основанных на использовании нейронных сетей и теории прецедентов для обнаружения зон прогара футеровки и вычисления веса транспортируемого чугуна.

Разработано ПО СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна, позволяющее вычислять вес чугуна на основе первичных данных с датчиков и осуществляющее поддержку принятия решений относительно ремонта и эксплуатации ковшей.

## Выводы

Таким образом, получены следующие результаты. Предложена и описана функциональная модель СППР для процесса транспортировки жидкого чугуна. Отличительной особенностью разработанной системы является возможность поддержки принятия решений о допустимости использования ковшей.

Данная возможность появилась за счет реализации методов автоматизированной диагностики футеровки ковшей и автоматизированного

## 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, no. 22, art. 8234. doi: 10.3390/ma15228234.
2. Branca T.A., Fornai B., Colla V., Murri M.M., Streppa 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 J.*, 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. doi: 10.24425/amm.2019.130126.
5. Vannucci M., Colla V., Chini M., Gasparido 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. Hanoglu U., Šarler B. Hot rolling simulation system for steel based on advanced meshless solution. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 7, art. 788. doi: 10.3390/met9070788.
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. Colla V., Martino R., Faes A., Schivalocchi M., Romaniello L. A robot performs the maintenance of the ladle sliding gate. *Stahl und Eisen*, 2019, no. 9, pp. 44–47.
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. *Unitecr2017*, 2022. URL: [http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper\\_rbofbhfcxshpgipoispm.pdf](http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper_rbofbhfcxshpgipoispm.pdf) (дата обращения: 10.08.2023).
11. Vannucci M., Ritacco A., Castellano A., Galli F., Vannucci M., Iannino V., Colla V. Flatness defect detection and classification in hot rolled steel strips using convolutional neural networks. In: *LNTCS. Proc. IWANN*, 2019, vol. 11507, pp. 220–234. doi: 10.1007/978-3-030-20518-8\_19.

12. Yang J., Zhang J., Guan M., Hong Y., Gao S., Guo W., Liu Q. Fine description of multi-process operation behavior in steelmaking-continuous casting process by a simulation model with crane non-collision constraint. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 10, art. 1078. doi: 10.3390/met9101078.

13. Chernyi S., Emelianov 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.

14. Yemelyanov V.A., Yemelyanova N.Yu., Nedelkin A.A., Glebov N.B., Tyapkin D.A. Information system to determine the transported liquid iron weight. *Proc. EIConRus*, 2019, pp. 377–380. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656693.

Software &amp; Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.282-288

2024, 37(2), pp. 282–288

### Increasing the level of automation and objectivity of decision-making when transporting liquid cast iron in production

Vitaly A. Yemelyanov<sup>1</sup>, Sergey G. Chernyi<sup>2,3</sup>✉, Nataliya Yu. Yemelyanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125167, Russian Federation

<sup>2</sup> Kerch State Maritime Technological University, Kerch, 298300, Russian Federation

<sup>3</sup> Kherson Technical University, Geniches, 275502, Russian Federation

#### For citation

Yemelyanov, V.A., Chernyi, S.G., Yemelyanova, N.Yu. (2024) 'Increasing the level of automation and objectivity of decision-making when transporting liquid cast iron in production', *Software & Systems*, 37(2), pp. 282–288 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.282-288

#### Article info

Received: 29.09.2023

After revision: 04.12.2023

Accepted: 23.01.2024

**Abstract.** The study solves the current applied problem of developing a decision support system for a liquid cast iron transporting process. The relevance of the work is due to the need to increase the level of automation and objectivity of decision-making when transporting liquid cast iron in production. The study uses the ArchiMate architecture modeling language to design the functional architecture of a decision support system for the process of transporting liquid cast iron. The authors used an object-oriented approach (including object-oriented analysis, object-oriented design and programming) and a unified modeling language UML to model use cases of a decision support system in the liquid iron transporting process. The study involves designing a model of the functional architecture of a decision support system for the process of transporting liquid cast iron. It also involves a functional analysis and an object-oriented design of the static structure of the decision support system. A decision support system software has been developed for transporting liquid cast iron; it allows calculating the weight of cast iron based on primary data from sensors and supporting decision-making regarding ladle repair and operation. The proposed functional model of the decision support system architecture made it possible to develop specialized software to automate the decision-making process regarding ladles repair and operation. The developed decision support system software was tested on ladle operation data at an iron and steel works.

**Keywords:** decision support system, software, architecture, cast iron transportation, ladle

#### References

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(22), 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 J.*, 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. doi: 10.24425/amm.2019.130126.
5. Vannucci, M., Colla, V., Chini, M., Gaspardo, 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. Hanoglu, U., Šarler, B. (2019) 'Hot rolling simulation system for steel based on advanced meshless solution', *Metals*, 9(7), art. 788. doi: 10.3390/met9070788.
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. Colla, V., Matino, R., Faes, A., Schivalocchi, M., Romaniello, L. (2019) 'A robot performs the maintenance of the ladle sliding gate', *Stahl und Eisen*, (9), pp. 44–47.

10. Lamm, R., Kirchhoff, S. (2022) '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', *Unitecr2017*, available at: [http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper\\_rbofbhxcshpgipoispm.pdf](http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper_rbofbhxcshpgipoispm.pdf) (accessed August 10, 2023).
11. Vannocci, M., Ritacco, A., Castellano, A., Galli, F., Vannucci, M., Iannino, V., Colla, V. (2019) 'Flatness defect detection and classification in hot rolled steel strips using convolutional neural networks', in *LNTCS. Proc. IWANN*, 11507, pp. 220–234. doi: 10.1007/978-3-030-20518-8\_19.
12. Yang, J., Zhang, J., Guan, M., Hong, Y., Gao, S., Guo, W., Liu, Q. (2019) 'Fine description of multi-process operation behavior in steelmaking-continuous casting process by a simulation model with crane non-collision constraint', *Metals*, 9(10), art. 1078. doi: 10.3390/met9101078.
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.
14. Yemelyanov, V.A., Yemelyanova, N.Yu., Nedelkin, A.A., Glebov, N.B., Tyapkin, D.A. (2019) 'Information system to determine the transported liquid iron weight', *Proc. EIConRus*, pp. 377–380. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656693.

**Авторы**

**Емельянов Виталий Александрович**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, v.yemelyanov@gmail.com

**Черный Сергей Григорьевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, научный сотрудник, sergiiblack@gmail.com

**Емельянова Наталия Юрьевна**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, n.yemelianova@gmail.com

**Authors**

**Vitaly A. Yemelyanov**<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, v.yemelyanov@gmail.com

**Sergey G. Chernyi**<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Research Associate, sergiiblack@gmail.com

**Nataliya Yu. Yemelyanova**<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, n.yemelianova@gmail.com

<sup>1</sup> Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, 125167, Россия

<sup>2</sup> Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, 298300, Россия

<sup>3</sup> Херсонский технический университет, г. Генчешек, 275502, Россия

<sup>1</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125167, Russian Federation

<sup>2</sup> Kerch State Maritime Technological University, Kerch, 298300, Russian Federation

<sup>3</sup> Kherson Technical University, Genichesk, 275502, Russian Federation