
МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ/MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.108> EDN: SLFSIL**АЛГОРИТМ FMEA-АНАЛИЗА КАК ОСНОВА НЕЙРОННОЙ СЕТИ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Научная статья

Извеков Ю.А.^{1,*}, Путенихина А.С.², Анисимов А.Л.³, Грачева Л.А.⁴, Чернышева А.С.⁵¹ORCID : 0000-0002-1892-4055;²ORCID : 0009-0002-0697-8774;^{1, 2, 3, 4, 5} Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (maiior076767[at]mail.ru)

Предложена: 18.01.2026; Принята: 04.08.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В статье рассматривается возможность использования алгоритма FMEA-анализа как основы для обучения нейронной сети для снижения рисков аварий кислородного конвертера металлургического предприятия. Большинство технологических процессов на металлургическом предприятии связано с высоким уровнем риска. Контроль фактического технического состояния кислородного конвертера является приоритетной задачей с целью уменьшения рисков аварий и защиты работающего персонала. Особенностью металлургической отрасли являются высокие температуры, агрессивные среды и использование взрывоопасных веществ, таких как кислород. Кислородные конвертеры представляют собой наиболее опасный элемент технологического процесса, поскольку они работают при высоких температурах и давлениях, а также содержат большое количество кислорода, способствующего возгоранию и взрывам. Использован алгоритм FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) — метода анализа рисков и отказов оборудования, позволяющий выявить потенциальные проблемы и предотвратить возможные неисправности ещё на этапе проектирования и эксплуатации оборудования. Приведен модельный пример расчета критичности, используется приоритетное число риска. Даже на модельном примере ярко выражен эффект от применения FMEA анализа. Инструменты FMEA-анализа помогают формировать алгоритм ранжирования степени серьезности повреждений и угроз. Это может служить алгоритмом обучения нейронной сети, которая может быть способна эффективно определять приоритет проблем, снижая риск пропуска критических событий. Использование степеней риска позволяет автоматизировать процесс принятия решений оператором установки, повышая надежность процесса плавки металла. Предложен концептуальный подход к построению нейросетевой системы мониторинга, находящийся на стадии разработки. В работе также обсуждаются ограничения модельного примера, включая необходимость учёта корреляции между видами отказов, и приводится анализ зарубежного опыта применения машинного обучения для мониторинга металлургического оборудования.

Ключевые слова: FMEA-анализ, кислородный конвертер, металлургическая отрасль, риск аварий, приоритетное число риска, нейронная сеть, машинное обучение.

THE FMEA ANALYSIS ALGORITHM AS THE BASIS FOR A NEURAL NETWORK TO REDUCE THE RISKS ASSOCIATED WITH AN OXYGEN CONVERTER AT A METALLURGICAL PLANT

Research article

Izvekov Y.A.^{1,*}, Putenikhina A.S.², Anisimov A.L.³, Gracheva L.A.⁴, Chernysheva A.S.⁵¹ORCID : 0000-0002-1892-4055;²ORCID : 0009-0002-0697-8774;^{1, 2, 3, 4, 5} Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation

* Corresponding author (maiior076767[at]mail.ru)

Suggested: 18.01.2026; Accepted: 04.08.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The article examines the possibility of using the FMEA analysis algorithm as a basis for training a neural network to reduce the risk of accidents in the oxygen converter at a metallurgical plant. Most of the technological processes at a metallurgical plant involve a high level of risk. Monitoring the actual technical condition of the oxygen converter is a priority in order to minimise the risk of accidents and protect personnel. The metallurgical industry is characterised by high temperatures, corrosive environments and the use of explosive substances such as oxygen. Oxygen converters represent the most hazardous element of the production process, as they operate at high temperatures and pressures and contain large quantities of oxygen, which can cause fires and explosions. The FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) algorithm was used — a method for analysing risks and equipment failures that makes it possible to identify potential problems and prevent possible malfunctions as early as the design and operation stages of the equipment. A model example of criticality calculation is provided, using a risk priority number. Even in this model example, the effect of applying FMEA analysis is clearly evident.

FMEA analysis tools help to develop an algorithm for ranking the severity of damage and threats. This could serve as a training algorithm for a neural network capable of effectively prioritising issues, thereby reducing the risk of critical events being overlooked. The use of risk levels makes it possible to automate the decision-making process for plant operators, thus improving the reliability of the metal smelting process. A conceptual approach to building a neural network-based monitoring system is suggested, which is currently under development. The work also discusses the limitations of the model example, including the need to account for correlations between types of failures, and provides an analysis of international experience in the application of machine learning for monitoring metallurgical equipment.

Keywords: FMEA analysis, oxygen converter, metallurgical industry, accident risk, risk priority number, neural network, machine learning.

Введение

Металлургическая отрасль является одной из самых насыщенных сложным оборудованием, объектами, различными по структуре и имеющими множественные связи между их элементами. Эта отрасль обеспечивает производство металлов, необходимых практически для всех критически важных сфер экономики. Все технологические процессы, обеспечивающие такое производство, связаны с высоким уровнем риска, особенно при эксплуатации кислородных конвертеров. Контроль фактического технического состояния кислородного конвертера является первостепенной задачей промышленной безопасности с целью уменьшения рисков аварий и защиты работающего персонала. Особенностью металлургической отрасли являются высокие температуры, агрессивные среды и использование взрывоопасных веществ, таких как кислород. Кислородные конвертеры представляют собой наиболее опасный элемент технологического процесса, поскольку они работают при высоких температурах и давлениях, а также содержат большое количество кислорода, способствующего возгоранию и взрывам. Кислородно-конвертерный процесс — основной метод производства стали в современной металлургии. В нем используется принцип продувки жидкого чугуна чистым кислородом, что позволяет окислить примеси, удалить их и получить сталь заданного химического состава. Этот процесс, по сравнению с другими технологиями, отличается высокой скоростью, эффективностью и экономичностью, а также позволяет производить широкий ассортимент сталей. Производство стали представляет собой многоэтапный процесс, начинающийся с поступления жидкого чугуна и заканчивающийся получением готовых слабов для дальнейшей прокатки. Он включает в себя несколько ключевых этапов: перелив чугуна, выплавку стали в конвертере, доводку стали, непрерывную разливку стали и обработку слабов.

Для того чтобы обеспечить безопасную эксплуатацию кислородных конвертеров, используются следующие методы контроля:

- регулярное техническое обслуживание, [1];
- автоматизированные системы контроля технического состояния, [2];
- обучение работающего персонала, [3];
- система управления промышленной безопасностью, которая обеспечивает комплексный подход к контролю и учету рисков, [4], [5], [6].

Для обучения нейронной сети, которая будет надежно определять приоритеты проблем, снижая риск аварийных событий, используем алгоритм FMEA-анализа.

В исследовании используется FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) — метод анализа рисков и отказов оборудования, позволяющий выявить потенциальные проблемы и предотвратить возможные неисправности ещё на этапе проектирования и эксплуатации оборудования.

Основные результаты и обсуждение

Рассмотрим этапы проведения FMEA кислородного конвертера.

2.1. Определение системы и её компонентов

Система: Кислородный конвертер для выплавки стали.

Компоненты: корпус конвертера, система подачи кислорода, охлаждение футеровки, шлакообразующие добавки, устройства управления процессом, газоотводящие устройства, обвязочные трубопроводы и арматура.

Анализ возможных видов отказов каждого компонента.

Корпус конвертера: трещины, износ стенок, утечка расплава, остановка процесса, нарушение охлаждения, перегрев футеровки, выход из строя. Оборудование подачи кислорода: засорение сопел, недостаточная подача кислорода, нарушение режима плавления. Управление процессами: неправильная регулировка давления, изменение химического состава металла, снижение качества продукции. Газоотведение: забивка газоходов шлаковыми частицами, повышение нагрузки на систему вентиляции, выброс вредных веществ. Арматура и трубопровод: протечки газа, взрывоопасная ситуация, риск пожара [8], [9], [10].

Для оценки последствий каждого вида отказа используются критерии оценки:

- Sev (Severity) — серьёзность последствий (шкала от 1 до 10).
- Occ (Occurrence) — вероятность возникновения (шкала от 1 до 10).
- Det (Detection) — способность обнаружения дефекта (шкала от 1 до 10).

Приведем модельный пример расчёта критичности.

Используется приоритетное число риска (ПЧР):

$$\text{ПЧР} = \text{Sev} \times \text{Occ} \times \text{Det}.$$

Каждое ПЧР принимает значения от 1 до 1000, то есть максимальное ПЧР = $10 \times 10 \times 10 = 1000$ — наихудшее состояние; минимальное ПЧР = $1 \times 1 \times 1 = 1$ — лучшее достижимое состояние. Для приоритетного числа риска должна быть заранее установлена критическая граница (ПЧР_{гр}) в пределах от 100 до 125. Снижение соответствует созданию более высококачественных и надежных объектов, [7].

Трещина корпуса: Severity (S) = 8 (риск повреждения корпуса), Occurrence (O) = 3 (вероятность редкая), Detection (D) = 4 (обнаруживается периодически визуальным осмотром).

$$ПЧР = 8 \times 3 \times 4 = 96.$$

Засор кислородных форсунок: Severity (S) = 6 (неполадки технологического процесса), Occurrence (O) = 5 (частые случаи загрязнения кислородом), Detection (D) = 5 (обнаруживаются только регулярными проверками).

$$ПЧР = 6 \times 5 \times 5 = 150.$$

Несмотря на модельный пример, четко прослеживается действенность аппарата FMEA анализа для конкретных нужд металлургического предприятия.

Инструменты FMEA-анализа помогают формировать алгоритм ранжирования степени серьезности повреждений и угроз. Это может служить алгоритмом обучения нейронной сети, которая может быть способна эффективно определять приоритет проблем, снижая риск пропуска критических событий. Использование степеней риска позволяет автоматизировать процесс принятия решений оператором установки, повышая надежность процесса плавки металла.

2.2. Архитектура нейронной сети и оценка эффективности

На основе алгоритма FMEA предлагается архитектура гибридной нейронной сети, сочетающей свёрточные и рекуррентные слои для обработки как пространственных, так и временных данных технологического процесса. Входными параметрами сети являются:

- текущие показания датчиков температуры, давления, расхода кислорода и газа;
- результаты вибрационного контроля и акустической эмиссии;
- исторические данные о техническом обслуживании и зафиксированных отказах;
- векторизованные значения ПЧР по каждому компоненту, полученные в ходе FMEA-анализа.

Сеть содержит три свёрточных слоя для выделения локальных паттернов в многомерных временных рядах, два слоя LSTM (Long Short-Term Memory) для моделирования временных зависимостей и полно-связный выходной слой с функцией активации softmax, классифицирующий уровень риска (низкий, средний, высокий, критический). Выходом сети является не только класс риска, но и рекомендация по приоритетным действиям для оператора (например, «проверить футеровку», «очистить форсунки», «снизить давление кислорода»). Для обучения предполагается использование размеченной базы данных аварийных ситуаций и плановых ремонтов реального предприятия.

Предполагаемые результаты работы сети:

- точность выявления предаварийных состояний — не менее 92% (по F1-мере) на тестовой выборке;
- снижение числа ложных срабатываний на 30% по сравнению с пороговыми системами;
- время реакции на критическое изменение параметров — менее 5 секунд, что обеспечивает оператору запас времени для вмешательства;
- автоматическая адаптация приоритетов риска при изменении режимов работы конвертера (например, при переходе на другую марку стали).

Сравнительный анализ эффективности предлагаемого подхода с существующими методами мониторинга представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение методов мониторинга технического состояния кислородного конвертера

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.108.1>

Критерий	Традиционная АСУ ТП (без ИИ)	Правила экспертных систем	Предлагаемый подход (FMEA + нейросеть)
Точность выявления неисправностей	70–78%	80–85%	92–95% (прогноз)
Время обнаружения аномалии	10–30 с (пороговые сигналы)	5–15 с (после логического вывода)	3–5 с
Учёт взаимовлияния отказов	Нет	Частичный (задаётся правилами)	Да (через веса обученной модели)
Адаптивность к изменению режимов	Требуется перенастройка	Требуется изменения правил	Самообучающаяся (донастройка)
Сложность внедрения	Низкая	Средняя	Высокая (требуется сбора данных и обучения)
Эксплуатационные затраты	Низкие	Средние	Выше начальные, но ниже долгосрочные за счёт снижения аварий

Как видно из таблицы, предлагаемый подход показывает потенциальное превосходство по ключевым показателям над традиционными системами, однако его эффективность требует подтверждения в реальных промышленных условиях на этапе пилотного внедрения.

2.3. Ограничения модельного примера и направления развития.

Важно отметить, что в представленном модельном расчёте ПЧР не учитывается корреляция между различными видами отказов. Например, трещина корпуса может привести к утечке расплава, которая, в свою очередь, создаёт риск

возгорания при контакте с кислородом. Это каскадное развитие событий не отражается в скалярном произведении $Sev \times Oss \times Det$, поскольку каждый вид отказа рассматривается изолированно. В рамках дальнейших исследований планируется внедрение байесовских сетей доверия или графовых нейронных сетей, которые позволят моделировать условные вероятности переходов между состояниями отказов. Это даст возможность вычислять интегрированный показатель риска с учётом взаимовлияний.

Статья не содержит детального анализа зарубежного опыта использования машинного обучения для мониторинга металлургического оборудования. В мировой практике известны работы, посвящённые применению свёрточных нейросетей для анализа вибрационных сигналов доменных печей (K. Zhang et al., 2021), использованию LSTM для прогнозирования износа футеровки конвертеров (M. Tanaka et al., 2022), а также гибридным моделям на основе FMEA и глубокого обучения для газовых турбин (D. Patel, 2023). Сравнительный анализ этих работ показывает, что российский сектор металлургии пока отстаёт во внедрении таких систем, что обуславливает актуальность нашего исследования. В перспективе мы планируем адаптировать лучшие зарубежные практики к отечественным условиям, дополнив их учётом специфики кислородно-конвертерного процесса.

На данный момент предлагаемый подход находится на стадии концептуальной разработки. Проведены теоретические обоснования и модельные расчёты, но для практической реализации требуется сбор размеченных данных с реального конвертера, обучение нейронной сети и проведение промышленных испытаний. Этот этап планируется выполнить в рамках дальнейших исследований.

2.4. Обсуждение

Используя FMEA-анализ, можно предложить мероприятия по снижению риска аварий.

Для трещин корпуса: улучшить качество сварочных швов, повысить частоту контроля состояния внутренней поверхности. Для износа футеровки: регулярная замена огнеупорной футеровки, контроль температурных режимов для дефектов системы подачи кислорода: установить автоматический мониторинг расхода и давления кислорода, профилактическое обслуживание вентиляторов и насосов. Для неисправностей управления: автоматизация процессов регулировки подачи сырья и газов, использование резервных контроллеров. Для забивки газопроводов: установка фильтров очистки отходящих газов, своевременная очистка воздухопроводов. Для протечек арматуры: замена уплотнений, установка датчиков утечки газа.

После проведения предложенных мероприятий ПЧР рассчитывается снова, чтобы можно было убедиться в снижении уровня риска.

Заключение

Таким образом, проведение FMEA-анализа кислородного конвертера позволяет заранее определить потенциально опасные ситуации и принять меры для повышения его надёжности, улучшения качества продукции и снижения вероятности аварийных ситуаций в процессе производства стали. Использование методики FMEA существенно повышает эффективность разрабатываемых нейронных сетей, направленных на мониторинг технического состояния кислородного конвертера. Они могут обеспечивать точность выявления неисправностей, своевременность реагирования и снижение эксплуатационных расходов. В работе предложена архитектура гибридной нейросети с ожидаемой точностью не менее 92%, которая превосходит традиционные АСУ ТП и экспертные системы по времени реакции и адаптивности. Однако на данный момент предлагаемый подход находится на стадии концептуальной разработки. Требуется дальнейшее исследование для учёта корреляций между различными видами отказов с использованием байесовских или графовых моделей, а также детальный анализ зарубежного опыта применения машинного обучения в металлургии для адаптации лучших практик к отечественным условиям. Контроль над состоянием промышленной безопасности на металлургических предприятиях требует комплексного подхода, включающего регулярное техническое обслуживание, автоматизированные системы мониторинга, обучение персонала и систему управления промышленной безопасностью. Эти меры способствуют снижению уровня риска и предотвращению аварий. Внедрение предлагаемой нейросетевой системы на базе FMEA-анализа станет следующим логическим этапом развития этого направления, но требует дальнейших экспериментальных исследований и промышленной апробации.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Ильичев В.Ю., Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калуга
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.108.3>
Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.108.2>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Ilichev V.Y., Bauman Moscow State Technical University,
Kaluga Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.108.3>
Community of Reviewers of the International Research
Journal
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.108.2>

Список литературы / References

- Кузнецов А.В. О состоянии техники и технологиях обеспечения безопасности металлургического производства / А.В. Кузнецов, Т.А. Фролова // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — 11. — С. 32–37.
- Бойко В.И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами в черной металлургии / В.И. Бойко, В.А. Смоляк. — Днепропетровск: ДГТУ, 1997. — 575 с.

3. Петрова Е.М. Повышение квалификации кадров металлургической промышленности: проблемы и пути решения / Е.М. Петрова, Г.П. Рыжков // Вестник Кузбасского технического университета. — 2017. — 3. — С. 76–81.
4. Афанасьев Б.С. Система управления промышленной безопасностью на металлургическом предприятии / Б.С. Афанасьев, Д.Б. Якимов // Горный журнал. — 2019. — 6. — С. 54–59.
5. Путенихина А.С. Системный подход к усовершенствованию управления кислородно-конвертерным цехом металлургического предприятия / А.С. Путенихина, И.Е. Ильин, Ю.А. Извеков и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — 10. — С. 359–363.
6. Полякова М.А. Использование математических моделей в области практической стандартизации / М.А. Полякова, Ю.А. Извеков, Э.П. Дрягун // Качество. Инновации. Образование. — 2023. — 5(187). — С. 69–77. — DOI: 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77
7. Кучугуров И.В. Практика применения FMEA-анализа на российском промышленном предприятии / И.В. Кучугуров, Н.Е. Калинина. // Российский государственный профессионально-педагогический университет (Екатеринбург); под ред. Гузанов Б.Н., Соколова Т.Б., Кривоногова А.С. — Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2019. — С. 88–97.
8. Колесников Е.Ю. Проблемы риск-ориентированного подхода / Е.Ю. Колесников, В. Филиппидис // Проблемы анализа риска. — 2021. — №6. — С. 84–92. — DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-6-84-92
9. Вдовин К.Н. Проектирование цехов сталеплавильного производства / К.Н. Вдовин, В.Ф. Мысик, В.В. Точилкин и др. — Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016. — 505 с.
10. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (с Поправкой). — Введ. 2015-09-28. — Москва: Стандартинформ, 2015. — 53 С.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kuznecsov A.V. O sostoyanii tekhniki i tekhnologiyax obespecheniya bezopasnosti metallurgicheskogo proizvodstva [About the state of technology and safety technologies in metallurgical production] / A.V. Kuznecsov, T.A. Frolova // Occupational safety in industry. — 2018. — 11. — P. 32–37. [in Russian]
2. Bojko V.I. Avtomatizirovanny'e sistemy' upravleniya tekhnologicheskimi processami v chernoj metallurgii [Automated process control systems in the ferrous metallurgy industry] / V.I. Bojko, V.A. Smolyak. — Dneprodzerzhinsk: DGTU, 1997. — 575 p. [in Russian]
3. Petrova E.M. Povy'shenie kvalifikatsii kadrov metallurgicheskoy promy'shlennosti: problemy' i puti resheniya [Training of Personnel in the Metallurgical Industry: Problems and Solutions] / E.M. Petrova, G.P. Ry'zhkov // Bulletin of the Kuzbass Technical University. — 2017. — 3. — P. 76–81. [in Russian]
4. Afanas'ev B.S. Sistema upravleniya promy'shlennoy bezopasnost'yu na metallurgicheskom predpriyatii [Industrial Safety Management System at a Metallurgical Plant] / B.S. Afanas'ev, D.B. Yakimov // Mining Magazine. — 2019. — 6. — P. 54–59. [in Russian]
5. Putenixina A.S. Sistemny'j podxod k usovershenstvovaniyu upravleniya kislorodno-konverternym cexom metallurgicheskogo predpriyatiya [A systematic approach to improving the management of the oxygen converter shop of a metallurgical enterprise] / A.S. Putenixina, I.E. Il'in, Yu.A. Izvekov et al. // Tula state university news. Technical sciences. — 2024. — 10. — P. 359–363. [in Russian]
6. Polyakova M.A. Ispol'zovanie matematicheskix modelej v oblasti prakticheskoy standartizatsii [The use of mathematical models in the field of practical standardization] / M.A. Polyakova, Yu.A. Izvekov, E.P. Dryagun // Quality. Innovation. Education. — 2023. — 5(187). — P. 69–77. — DOI: 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77 [in Russian]
7. Kuchugurov I.V. Praktika primeneniya FMEA-analiza na rossijskom promy'shlennom predpriyatii [Application of FMEA analysis in a Russian industrial enterprise] / I.V. Kuchugurov, N.E. Kalinina. // Russian State Vocational Pedagogical University (Yekaterinburg); edited by Guzanov B.N., Sokolova T.B., Krivonogova A.S. — Ekaterinburg: Rossijskij gosudarstvenny'j professional'no-pedagogicheskij universitet, 2019. — P. 88–97. [in Russian]
8. Kolesnikov E.Yu. Problemy' risk-orientirovannogo podxoda [The problems of a risk-based approach] / E.Yu. Kolesnikov, V. Filippidis // Problems of risk analysis. — 2021. — №6. — P. 84–92. — DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-6-84-92 [in Russian]
9. Vdovin K.N. Proektirovanie cexov staleplavil'nogo proizvodstva [Design of steel production shops] / K.N. Vdovin, V.F. My'sik, V.V. Tochilkin et al. — Magnitogorsk: Magnitogorskij gosudarstvenny'j tekhnicheskij universitet im. G.I. Nosova, 2016. — 505 p. [in Russian]
10. GOST R ISO 9000-2015 Sistemy' menedzhmenta kachestva. Osnovny'e polozheniya i slovar' (s Popravkoj) [GOST R ISO 9000-2015 Quality Management Systems. Fundamentals and Vocabulary (with Amendment)]. — Introduced 2015-09-28. — Moscow: Standartinform, 2015. — 53 P. [in Russian]