

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ КАК ОСНОВА ОРГАНИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

STRUCTURAL-PARAMETRIC MODEL OF A DIGITAL FACTORY AS THE BASIS FOR ALUMINUM PRODUCTION MANAGEMENT

Нугманов Д.И., инженер-исследователь, кафедра систем автоматизации и управления технологическими процессами, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (Казань, Россия)

Нурғалиев Р.К., заведующий кафедрой, кафедра систем автоматизации и управления технологическими процессами, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (Казань, Россия)

Nugmanov D.I., Research Engineer, the Department of process automation and control, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia)

Nurgaliev R.K., Head of the Department, the Department of process automation and control, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia)

Эффекты цифровизации производственных систем определяют растущий интерес предприятий к комплексной модернизации процессов. Создание модели цифровой фабрики позволяет реализовать системный подход к цифровой трансформации предприятия, обеспечивая повышение качества процессов и продукции, надежность и эффективность производства. Важное значение имеет учет отраслевой специфики технологических процессов. В центре внимания авторов – проблематика моделирования цифровой фабрики алюминиевого производства. Цель исследования – разработка структурно-параметрической модели цифровой фабрики, адаптированной для предприятий алюминиевой промышленности. В ходе исследования путем систематизации проблемного поля, характеристик, нормативной базы построен концептуальный каркас моделирования алюминиевого производства, обеспечивающий теоретическую основу для создания модели цифровой фабрики; предложена структурно-параметрическая модель цифровой фабрики алюминиевого производства (на примере системы управления качеством), интегрирующая современные цифровые инструменты и иерархическую систему управления потоками; обоснована роль цифровых двойников в модели цифровой фабрики. Моделирование цифровой фабрики алюминиевого производства позволяет решить задачу импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета.

Ключевые слова: алюминиевое производство, производственная система, цифровая фабрика, цифровой двойник, управление качеством.

Для цитирования: Нугманов Д.И., Нурғалиев Р.К. Структурно-параметрическая модель цифровой фабрики как основа организации алюминиевого производства // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2026. № 2(89). С. 38–43.

Effects of digitalization of production systems determine the growing interest of enterprises in comprehensive process modernization. Creating a digital factory model enables the implementation of a systematic approach to the digital transformation of an enterprise, ensuring improved quality of processes and products, reliability, and production efficiency. Consideration of the industry-specific nature of technological processes is of great importance. The authors focus on the problems of modeling a digital factory for aluminum production. The purpose of the study is to develop a structural-parametric model of a digital factory adapted for enterprises in the aluminum industry. In the course of the study, by systematizing the problem field, characteristics, regulatory framework, and principles, a conceptual framework for modeling aluminum production was constructed, providing a theoretical basis for creating a digital factory model; a structural-parametric model of a digital factory for aluminum production (using the example of a quality management system) was proposed, integrating modern digital tools and a hierarchical flow management system; the role of digital twins in the digital factory model was substantiated. Modeling a digital factory for aluminum production makes it possible to solve the problem of import substitution and ensure technological sovereignty.

Keywords: aluminum production, production system, digital factory, digital twin, quality management.

For citation: Nugmanov D.I., Nurgaliev R.K. Structural-Parametric Model of a Digital Factory as the Basis for Aluminum Production Management. Information-economic aspects of standardisation and technical regulation. 2026; 2(89): 38–43. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция цифровых технологий в производственные системы становится неотъемлемым элементом их стратегии развития, действенным инструментом повышения эффективности, качества и экологичности технологических процессов. Однако фрагментарной цифровой трансформации становится недостаточно, требуется системный подход, адекватный условиям Четвертой промышленной революции.

Потенциал цифровизации весьма высок, охватывает широкий инструментальный спектр, от сбора первичных данных на полевом уровне до автоматизированного проектирования, имитационного моделирования, предиктивной аналитики и интеллектуальной системы поддержки принятия решений. В масштабах производственной системы актуальным инструментом выступает «цифровая фабрика». Ее базовая структура регламентирована стандартами ГОСТ Р 70265.1–2022 «Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения» [1] и ГОСТ Р 70265.2–2024 «Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 2. Элементы модели» [2]. Однако для применения в конкретной отрасли требуется адаптация данных положений.

В России цифровая трансформация совмещена с целями политики импортозамещения. На фоне ухода зарубежных поставщиков программных продуктов (Siemens, SAP и др.) крупные предприятия усилили фокус на разработке корпоративных информационных систем с учетом специфики технологических процессов или обоснованном выборе готовых отечественных решений. Данная проблема также затронула алюминиевые производства, в технологические цепочки которых активно внедряются умные устройства, автоматизированные системы, роботы [3].

Вышесказанное определяет важность разработки такой модели цифровой фабрики, которая учитывает специфику сырья, оборудования, технологических процессов алюминиевого производства.

Концептуально модель цифровой фабрики описывает производственную систему в цифровом формате [1]. Структурно цифровая фабрика рассматривается как элемент умной фабрики и более масштабно как блок виртуальной фабрики; базируется на цифровых двойниках изделия и материала и формирует модель изделия, материала, производственного участка [4]. С позиции жизненного цикла изделия цифровая фабрика представляет собой систему технологий проектирования и производства конкурентоспособной продукции на этапах планирования изделия, проектирования изделия, планирования производства; «умная» фабрика дополнительно включает этапы пусконаладочных работ и серийного производства; виртуальная фабрика охватывает

все этапы жизненного цикла изделия [5]. Таким образом, неотъемлемым элементом модели цифровой фабрики является цифровой двойник, умные модели продуктов. Если разработке цифровых двойников в отрасли посвящен обширный массив научных исследований [6, 7], то проблематика моделирования цифровой фабрики алюминиевого производства исследована слабо.

Цель исследования – разработка структурно-параметрической модели цифровой фабрики, адаптированной для предприятий алюминиевой промышленности.

Достижение цели исследования предполагает решение ряда задач:

- 1) построить концептуальную структуру моделирования алюминиевого производства;
- 2) разработать структурно-параметрическую модель цифровой фабрики алюминиевого производства.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ КАРКАС МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛЮМИНЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Алюминиевое производство представляет собой сложную технологическую систему, определяющую жесткие требования к разрабатываемым математическим моделям и, как следствие, необходимость формирования концептуального каркаса, интегрирующего структурные, параметрические и функциональные аспекты моделирования (см. рис. 1).

Потребность формирования цифровой инфраструктуры предприятия обусловлена рядом причин, наиболее острыми из которых являются необратимый переход к интеллектуальным технологиям организации производства, технологическая политика государства и принципы устойчивого развития. Это определяет объект, предмет и цель моделирования производственной системы.

Нормативно-правовую основу создания модели цифровой фабрики образуют национальные стандарты (включая ГОСТ Р МЭК 62264-2–2016 «Интеграция систем управления предприятием. Часть 2. Объекты и атрибуты» [8], ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [9]), информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 11-2022 «Производство алюминия» [10] и другие документы.

Среди принципов моделирования выделим принципы иерархичности и полноты данных. В первом случае речь идет о четырехуровневой структуре модели, где:

- полевой уровень объединяет контрольно-измерительные приборы, датчики, камеры;



Рис. 1. Концептуальный каркас моделирования алюминиевого производства

- уровень АСУТП обеспечивает автоматическое регулирование технологических параметров, первичную обработку данных (АСУТП именникового оборудования, операторские системы управления основным и вспомогательным производством, система хранения данных и др.);
- уровень управления производством обеспечивает календарное и оперативное планирование, управление качеством и материалами, обслуживание активов;
- уровень управления предприятием обеспечивает стратегическое планирование, управление материальными потоками, активами, финансами, продажами, персоналом и др.

Принцип полноты данных предполагает включение в модель цифровой фабрики всех значимых параметров, определяющих качество выпускаемой продукции и техническую эффективность производства. Исходя из этого массив параметров объединяет:

1) входные – характеристики сырья и материалов (пек каменноугольный, кокс нефтяной сырой и др.), складские остатки запасов, численность персонала;

2) технологические – параметры процессов (рецептуры, температура, скорость литья, давление, расход воды и др.);

3) выходные – характеристики готовой продукции, включая коэффициент годного продукта;

4) параметры состояния – износ оборудования, отклонения процесса производства от состояния статистической управляемости, индексы пригодности и воспроизводимости процесса и др.;

5) ресурсные – потребление энергетических, водных ресурсов.

Совокупность знаний о производственных процессах позволяет сформулировать обобщенную модель цифровой фабрики алюминиевого производства (1):

$$M = f(E, R, P, F, C), \quad (1)$$

где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – множество элементов моделируемой системы (машины, оборудование, цеха и др.);

$R_{inf} = \{r_{inf_1}, r_{inf_2}, \dots, r_{inf_n}\}$ и $R_{mat} = \{r_{mat_1}, r_{mat_2}, \dots, r_{mat_n}\}$ – множество информационных и материальных потоков, связывающих элементы системы между собой;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество параметров, характеризующих состояние элементов системы;

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ – множество функций, описывающих изменение параметров, связи между элементами;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – множество ограничений производственной системы (ресурсные, технологические, предельные / пороговые значения).

Предложенный концептуальный каркас моделирования служит методологической основой для разработки структурно-параметрической модели цифровой фабрики и инструментария управления производством.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ

Содержательно модель связывает в единую систему физическую, цифровую и управляющую подсистемы (рис. 2). Согласно стандарту ГОСТ Р 70265.1–2022 базовая структура цифровой фабрики определяет [1]:

- модель активов производственной системы (детали, устройства, оборудование, программное обеспечение и т.п., т.е. объекты в составе производственной системы);

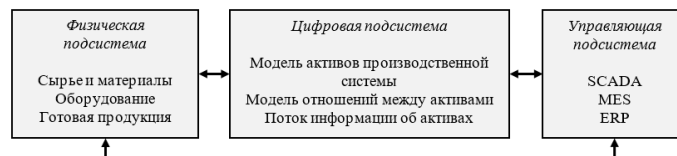


Рис. 2. Подсистемы модели цифровой фабрики

- модель отношений между активами (взаимосвязи между двумя и более элементами);
- поток информации об активах (идентификационная, о статусе актива, серийный номер, роль, ссылки и др.).

Структурно-параметрическая модель представляет собой формализованное описание сложной системы, которое отражает структурный и параметрический аспект. В контексте моделирования производственных процессов под структурой понимается иерархия уровней управления и совокупность параметров, характеризующих тот или иной элемент моделируемой системы.

Далее представлен фрагмент модели, сфокусированный на блоке управления качеством (рис. 3). Блок объединяет 3 подблока: автоматизированную систему аналитического контроля (АСАК), автоматизированную систему управления рецептурами (АСУР) и систему контроля качества про-

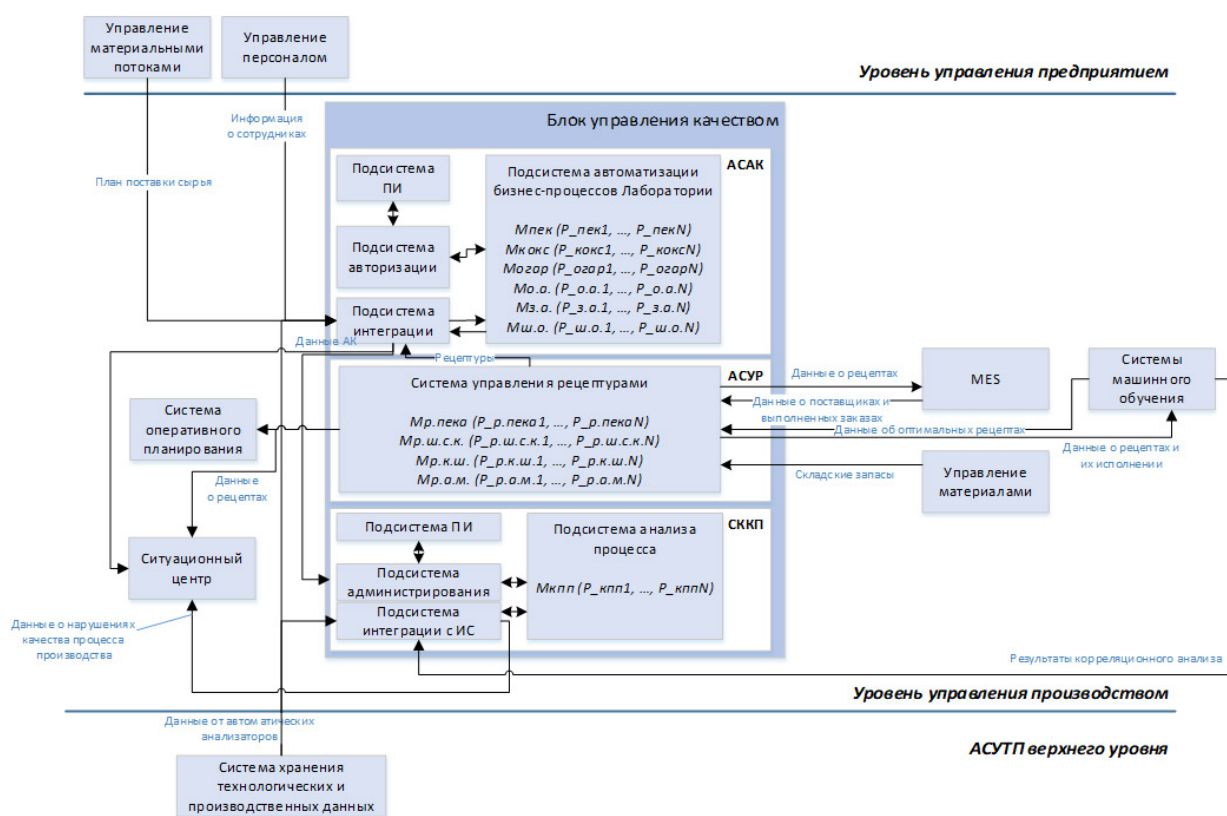


Рис. 3. Фрагмент структурно-параметрической модели цифровой фабрики

цесса (СККП). Каждый подблок включает подсистемы (пользовательский интерфейс (ПИ), авторизация, интеграция с информационными системами (ИС) и др.).

1) АСАК. Модель подсистемы автоматизации бизнес-процессов лаборатории, обслуживающей производство анодов, учитывает следующую совокупность параметров:

а) Мпек (параметры входного контроля пека каменноугольного) – массовая доля воды в твердом пеке, температура размягчения, коксовое число, вязкость, зольность и др.;

б) Мкокс (параметры кокса нефтяного сырого) – массовая доля общей влаги, зольность, массовая доля летучих веществ, примеси и др.;

в) Могар (огарки обожженных анодов) – действительная плотность, зольность, влага, вибрационная объемная плотность, удельное электрическое сопротивление и др.;

г) Мо.а. (обожженные аноды) – действительная плотность, кажущаяся плотность, зольность, удельное электрическое сопротивление, предел прочности на сжатие и др.;

д) Мз.а. (зеленые аноды) – действительная плотность, кажущаяся плотность, зольность, примеси, прочность на сжатие;

е) Мш.о. (шихта огарков) – действительная плотность, вибрационная объемная плотность, влага, удельное электрическое сопротивление и др.

2) АСУР. Модель подсистемы управления рецептурами опирается на ингредиентный состав рецептур:

а) технологического пека (Мр.пека);

б) шихты сырого кокса (Мр.ш.с.к.);

в) коксовой шихты (Мр.к.ш.);

г) анодной массы (Мр.а.м.).

3) СККП. Модель подсистемы анализа процесса учитывает следующие показатели качества: количество обнаружений признаков отклонения процесса производства от состояния статистической управляемости, количество пропущенных фактов отклонений, коэффициент достоверности идентифицированного признака отклонения, коэффициент годной продукции и др.

Блок управления качеством интегрируется с блоками верхнего уровня управления (управление персоналом, управление материальными потоками), третьего уровня (АСУР, СККП, управление заказами-нарядами в блоке MES, система управления складом сырья в блоке управления материалами, ситуационный центр), второго уровня (система хранения данных), а также системой машинного обучения в части обмена данными о рецептах.

Цифровой двойник позволяет усовершенствовать производственные процессы путем реализации рекомендательных моделей, сократить брак, простои оборудования, повысить скорость принятия наилучшего решения за счет консолидации информационных потоков, поступающих от:

- операторских систем управления производством, автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления (оперативные данные);
- системы оперативного планирования производства (третий уровень);
- системы управления основными данными (верхний четвертый уровень).

В концепции цифровой фабрики построенная структурно-параметрическая модель учитывает специфические параметры алюминиевого производства, обеспечивает синхронизацию между физическими и цифровыми объектами, интеграцию разнородных данных в едином цифровом пространстве, служит базой для имитационного моделирования производственных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества моделирования цифровой фабрики заключаются в возможности повысить качество процессов и готовой продукции, обеспечить надежность и эффективность функционирования производства. Сформулированный подход к моделированию цифровой фабрики позволяет решить проблему ограничения доступа к зарубежным решениям Siemens, SAP в сфере алюминиевого производства.

К научным результатам, полученным в ходе исследования, относятся следующие:

1) построен концептуальный каркас моделирования алюминиевого производства, ориентированный на внедрение отечественных программных решений, отличающийся интеграцией проблемно-ориентированного подхода, иерархической структуры управления, параметрической классификации и математической формализации, что обеспечивает теоретическую основу для создания модели цифровой фабрики алюминиевого производства;

2) предложена структурно-параметрическая модель цифровой фабрики алюминиевого производства (на примере системы управления качеством), учитывающая специфические отраслевые параметры, интегрирующая современные цифровые инструменты и иерархическую систему управления потоками, обеспечивающая сквозное управление, возможность проектирования новых и модернизации действующих производств.

Список литературы

1. ГОСТ Р 70265.1–2022 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. 36 с.
2. ГОСТ Р 70265.2–2024 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 2. Элементы модели. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. 40 с.
3. Цифровая эра: как «Индустрия 4.0» пришла в алюминиевую отрасль. URL: https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_management/cifrovaya-era/ (дата обращения: 24.02.2026). Текст: электронный.
4. Ткаченко И.С., Антипов Д.В., Куприянов А.В., Смелов В.Г., Кокарева В.В. Концептуальная модель цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 3(113). С. 90–106.
5. Фабрики будущего. URL: <https://technet.spbstu.ru/article/fabriki-buducshego> (дата обращения: 24.02.2026). Текст: электронный.
6. Чистяков Д.Г., Голубев В.О., Александров А.В. Цифровой двойник глиноземного производства на примере АО «РУСАЛ Ачинск» // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 10. С. 159–165.
7. Бажин В.Ю., Чан Д.Х. Технологии литья и прокатки алюминиевых сплавов: цифровизация и перспективы применения // Инженерный вестник Дона. 2025. № 2(122). С. 860–874.
8. ГОСТ Р МЭК 62264-2–2016 Интеграция систем управления предприятием. Часть 2. Объекты и атрибуты. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2016. 170 с.
9. ГОСТ Р ИСО 9001–2015 Системы менеджмента качества. Требования. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
10. ИТС 11-2022 Производство алюминия. Утвержден приказом Росстандарта от 16.12.2022 г. № 3197. URL: <https://burondt.ru/its> (дата обращения: 24.02.2026). Текст: электронный.

References

1. GOST R 70265.1–2022 Izmerenie, upravlenie i avtomatizaciya promyshlennogo processa. Struktura cifrovoj fabriki. Chast' 1. Osnovnye polozheniya [Industrial-process measurement, control and automation. Digital factory framework. Part 1. General provisions]. Izdanie oficial'noe. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2022. 36 p.
2. GOST R 70265.2–2024 Izmerenie, upravlenie i avtomatizaciya promyshlennogo processa. Struktura cifrovoj fabriki. Chast' 2. Elementy modeli [Industrial-process measurement, control and automation. Digital factory framework. Part 2. Model elements]. Izdanie oficial'noe. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2024. 40 p.
3. The Digital Era: How Industry 4.0 Came to the Aluminum Industry. Available at: https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_management/cifrovaya-era/ (accessed: 24.02.2026).
4. Tkachenko, I.S., Antipov, D.V., Kupriyanov, A.V., Smelov, V.G., Kokareva, V.V. Konceptual'naya model' cifrovogo zavoda proizvodstvennogo predpriyatiya aerokosmicheskoy otrasli [Conceptual model of the digital plant of manufacturing enterprises in the aerospace industry]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2023, vol. 25, no. 3(113), pp. 90–106.
5. Factories of the Future. Available at: <https://technet.spbstu.ru/article/fabriki-buducshego> (accessed: 24.02.2026).
6. Chistyakov, D.G., Golubev, V.O., Aleksandrov, A.V. Cifrovoy dvojn timer glinozemnogo proizvodstva na primere AO «RUSAL Achinsk» [Digital twin of alumina refinery: case study of JSC “RUSAL Achinsk”]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2023, vol. 26, no. 10, pp. 159–165.
7. Bazhin, V.Yu., Chan, D.H. Tekhnologii lit'ya i prokatki alyuminievykh splavov: cifrovizaciya i perspektivy primeneniya [Aluminum alloy casting and rolling technologies: digitalization and application prospects]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025, no. 2(122), pp. 860–874.
8. GOST R MEK 62264-2–2016 Integraciya sistem upravleniya predpriyatiem. Chast' 2. Ob'ekty i atributy [Enterprise control system integration. Part 2. Objects and attributes]. Izdanie oficial'noe. M.: Standartinform, 2016. 170 p.
9. GOST R ISO 9001–2015 Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality management systems. Requirements]. Izdanie oficial'noe. M.: Standartinform, 2020. 32 p.
10. ITS 11-2022 Proizvodstvo alyuminiya [ITS 11-2022 Aluminum production]. Approved by Order of Rosstandart No. 3197 dated 16.12.2022. Available at: <https://burondt.ru/its> (accessed: 24.02.2026).