

Автоматизированные системы управления технологическими процессами Automated process control systems

Научная статья

УДК 004.9

DOI: 10.14529/ctcr260309

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО КОНТУРА «ТЕМНОЙ ФАБРИКИ» ПРЕССОВОГО ОТДЕЛЕНИЯ

О.В. Логиновский, loginovskii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

И.К. Гордеев, ik.gordeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7560-922X>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Переход прессового отделения огнеупорного производства к модели «темной фабрики» требует не только модернизации оборудования, но и воспроизводимого цифрового описания участка. В условиях действующего производства исходные сигналы, ремонтные записи и сведения о состоянии машин остаются разнородными, поэтому первоочередной задачей становится формирование минимально достаточного наблюдающего контура без раскрытия закрытых технологических данных. **Цель исследования:** предложить методику формирования минимально достаточного событийного цифрового контура прессового отделения огнеупорного производства, необходимого для поэтапного перехода от локальной автоматизации оборудования к модели «темной фабрики» и применимого как стартовый этап диссертационной апробации. **Методы и материалы.** Использованы системный анализ производственного участка, декомпозиция прессово-роботизированной ячейки, событийное моделирование, онтологическое описание ресурсов оборудования, нормирование показателей цифровой наблюдаемости и экспертная классификация сведений, допустимых для открытой публикации. Принцип минимальной достаточности означает включение только тех событий, состояний, параметров и правил, без которых нельзя восстановить состояние участка, проверить качество данных и подготовить основу для диагностики. Предметная область рассмотрена на примере оборудования Laeis и роботизированных комплексов АВВ в производственном контуре Группы «Магnezит» без раскрытия закрытых технологических параметров, рецептур, адресов сигналов и коммерческих показателей. **Результаты.** Обоснована структура контура: объектная модель участка, обязательные события, справочник состояний, правила нормализации записей, интеграционный слой, журнал качества данных и индексы готовности к автономному режиму. Показано, что для действующего промышленного участка с неполными ремонтными журналами первичным результатом должна быть не прогнозная модель отказов, а воспроизводимая методика получения достоверного цифрового следа. Сформулированы требования к наблюдающему прототипу, который фиксирует события пресса и робота без вмешательства в контур управления, задает границы массива Р0 и создает основу для диагностики, технического обслуживания и оценки цифровой зрелости. **Заключение.** Методика переводит инженерное описание прессового отделения в формализованную систему данных, пригодную для диссертационного исследования по специальности 2.3.3 и дальнейшей опытной апробации. До заполнения первичного массива наблюдений Р0 статья не заявляет доказанный экспериментальный, производственный или экономический эффект.

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов, темная фабрика, событийный цифровой контур, минимально достаточный контур, огнеупорное производство, прессово-роботизированная ячейка, цифровая наблюдаемость

Для цитирования: Логиновский О.В., Гордеев И.К. Методика формирования цифрового контура «темной фабрики» прессового отделения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 103–113. DOI: 10.14529/ctcr260309

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260309

METHODOLOGY FOR FORMING THE DIGITAL CONTROL LOOP OF A DARK FACTORY PRESS DEPARTMENT

O.V. Loginovskiy, loginovskii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

I.K. Gordeev, ik.gordeev@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7560-922X>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Transition of a refractory production press department to a dark factory model demands a reproducible digital description, not only equipment modernization. In an operating plant, signals, maintenance records and machine-state data remain heterogeneous and cannot support diagnostics; therefore, the first task is to form a minimum sufficient observing contour without disclosing restricted technological data. **The research objective.** To propose a methodology for forming a minimum sufficient digital contour of a refractory production press department, required for transition from local automation to a dark factory model and suitable for dissertation approbation. **Methods and materials.** The study uses systems analysis, decomposition of a press and robot cell, ontology-based description of equipment resources, normalization of digital observability indicators and expert classification of information allowed for open publication. Minimum sufficiency means including only events, states, parameters and rules needed to reconstruct the area state, check data quality and prepare diagnostics. The domain is considered using Laeis press equipment and ABB robotic complexes in the Magnezit Group production contour without disclosing restricted parameters, recipes, signal addresses or commercial indicators. **Results.** The contour structure is substantiated: an object model, required events, a state directory, normalization rules, an integration layer, a data quality log and readiness indices. For an operating area with incomplete maintenance logs, the primary result should be not a predictive failure model but a reproducible methodology for obtaining a reliable digital trace. Requirements are formulated for an observing prototype that records press and robot events without affecting the control loop, defines dataset P0 and creates a basis for diagnostics and digital maturity assessment. **Conclusion.** The methodology transforms the engineering description of a press department into a formalized data system suitable for dissertation research in process automation and control. Until dataset P0 is completed, the paper does not claim a proven experimental, production or economic effect.

Keywords: process automation, dark factory, event-driven digital contour, minimum sufficient contour, refractory production, press and robot cell, digital observability

For citation: Loginovskiy O.V., Gordeev I.K. Methodology for forming the digital control loop of a dark factory press department. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):103–113. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260309

Введение

В работах научной школы О.В. Логиновского управление промышленными предприятиями рассматривается как сочетание стратегического, оперативного и информационно-аналитического уровней [1, 2]. Для диссертационной темы, связанной с автоматизацией огнеупорного производства, этот подход важен тем, что позволяет не противопоставлять инженерную практику и научную постановку задачи. Прессовое отделение должно рассматриваться одновременно как технологический объект, как система сбора данных и как элемент общей производственной системы предприятия.

Огнеупорное производство относится к классу технологически сложных систем, в которых качество изделия формируется цепочкой взаимосвязанных операций: подготовкой массы, дозированием, прессованием, манипулированием заготовкой, сушкой, термической обработкой, контролем и логистикой. Для углеродсодержащих MgO-C материалов эта цепочка чувствительна к стабильности рецептуры, режимам уплотнения, состоянию прессовой оснастки и качеству промежуточной транспортировки [3, 4]. Поэтому переход к более высокому уровню автоматизации должен учитывать как предметную специфику огнеупоров, так и логику развития направления Refractories 4.0 [5].

Понятие «темная фабрика» в данной статье используется не как рекламное обозначение полной безлюдности, а как целевое состояние технологического участка, при котором основные опе-

рации могут выполняться без постоянного участия оператора в нормальном режиме, а персонал переходит к ролям настройки, контроля, диагностики, обслуживания и принятия решений при отклонениях. Для такого перехода нужны не только исполнительные механизмы, но и цифровой контур: согласованный набор источников данных, событий, правил, моделей состояния и интерфейсов между АСУ ТП, роботами, производственной аналитикой и системой технического обслуживания.

Цель статьи – предложить методику формирования минимально достаточного событийного цифрового контура прессового отделения огнеупорного производства, пригодную для дальнейшей опытной реализации в условиях Группы «Магнезит» и соответствующую направлению 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

1. Постановка задачи

Прессовое отделение в огнеупорном производстве имеет несколько особенностей, которые отличают его от типовых дискретных участков машиностроения. Во-первых, изделие формируется из массы, свойства которой зависят от состава, влажности, гранулометрии и подготовки. Во-вторых, пресс является одновременно энергетически нагруженной машиной, технологическим исполнительным механизмом и источником диагностических данных. В-третьих, роботизированный контур выполняет не только транспортную, но и стабилизирующую функцию: он снижает вариативность манипулирования сырцом, но сам становится источником новых отказов и отклонений.

При переходе к «темной фабрике» возникает противоречие. С одной стороны, современные прессы, роботы, контроллеры, приводы и SCADA-системы уже генерируют большое число сигналов. С другой стороны, эти сигналы часто остаются локальными: они используются для управления циклом конкретной машины, но не формируют целостной картины состояния участка. Журналы ремонтов и ручные записи, если они ведутся номинально, не могут служить надежной основой для построения предиктивных моделей. Поэтому первым научно-практическим результатом должна стать не «нейросеть для ремонта», а воспроизводимая методика цифрового описания участка.

Задача формулируется следующим образом. Для прессового отделения требуется построить минимально достаточный событийный цифровой контур $C_{\min}$. В формуле (1) указано, что контур включает только те элементы, без которых нельзя наблюдать цикл участка, восстанавливать его состояние и готовить данные для диагностики: множество технологических объектов O , множество обязательных событий E_{req} , множество параметров P , множество состояний S , набор правил R и набор нормированных показателей K :

$$C_{\min} = \{O, E_{req}, P, S, R, K\}. \quad (1)$$

Такой контур должен обеспечивать:

- регистрацию технологически значимых событий без раскрытия коммерчески чувствительных объемов производства;
- связь событий оборудования с состоянием технологического процесса;
- формирование признаков для диагностики и последующего прогнозирования;
- возможность поэтапной интеграции с АСУ ТП, роботизированными комплексами, производственной аналитикой и системой ТОиР;
- оценку готовности участка к более автономному режиму работы.

В рамках открытой публикации не рассматриваются абсолютные объемы производства, конкретные рецептуры, закрытые режимы, параметры коммерческой эффективности и детализация производственных заданий. Вместо этого применяются нормированные показатели, например доля доступных сигналов, полнота регистрации событий, относительная длительность состояний и индекс готовности данных.

2. Методика формирования цифрового контура

Предлагаемая методика включает семь этапов.

Первый этап – определение границ участка. В границы цифрового контура включаются пресс Laeis, связанные загрузочные и разгрузочные устройства, робот АВВ, шкафы управления,

операторские панели, локальные средства безопасности, линии передачи данных и программные интерфейсы, через которые возможно получить события или параметры. Граница выбирается не по организационному признаку, а по технологическому циклу: от поступления подготовленной массы к прессу до передачи сформованного изделия на следующую операцию.

Второй этап – построение объектной модели. Для каждого объекта фиксируются его роль, уровень управления, доступные сигналы, типы событий и зависимость от соседних объектов. Например, пресс описывается через контуры давления, перемещения, циклов, блокировок, аварий, наладочных режимов и обслуживания. Робот описывается через программу, координатные зоны, захват, состояние контроллера, события безопасности и межмашинное взаимодействие.

Третий этап – классификация событий. Для практического внедрения события целесообразно разделить на технологические, диагностические, организационные и события безопасности. Технологические события отражают выполнение цикла прессования и перемещения изделия. Диагностические события показывают изменение состояния оборудования: предупреждения, аварии, отклонения, сервисные действия. Организационные события связаны с началом смены, переналадкой, остановом, ожиданием задания. События безопасности фиксируют срабатывания блокировок, защитных дверей, световых завес и аварийных цепей.

Четвертый этап – нормализация данных. В разных подсистемах один и тот же факт может иметь разные имена, временные метки и единицы измерения. Поэтому вводится единая структура записи события: идентификатор объекта, тип события, временная метка, состояние до события, состояние после события, источник, достоверность, признак открытости публикации. Последний признак нужен для отделения данных, которые можно использовать в научной статье, от данных, требующих внутреннего режима доступа.

Пятый этап – формирование онтологической модели ресурсов. Онтологический подход к управлению ресурсом оборудования рассматривается в работах О.В. Логиновского, В.А. Беляковой и А.А. Шинкарева [6]. Для прессового отделения онтология должна включать классы «оборудование», «узел», «сигнал», «событие», «состояние», «операция», «отказ», «действие обслуживания», «ограничение публикации». Это позволяет перейти от разрозненных тегов контроллера к осмысленному представлению технологического участка.

Шестой этап – организация интеграционного слоя. С учетом работ по цифровым двойникам [7–9], гибким производственным линиям [10] и процессно-событийной интеграции [11] интеграционный слой должен выполнять не только сбор данных, но и согласование временных шкал, контроль качества данных, маршрутизацию событий и подготовку признаков для аналитики. Для первого прототипа достаточно реализовать минимальный контур: сбор событий прессы и робота, буфер событий, справочник объектов, витрину нормированных показателей и журнал качества данных.

Седьмой этап – оценка готовности к «темной фабрике». Готовность участка определяется не наличием отдельных автоматизированных машин, а способностью участка поддерживать управляемый режим без ручного восполнения критически важной информации. Поэтому предлагается использовать пять нормированных индексов:

- K_d – полнота данных, доля требуемых сигналов и событий, которые фактически доступны;
- K_q – качество данных, доля записей с корректной временной меткой, источником и допустимым значением;
- K_s – наблюдаемость состояний, доля времени, для которого можно однозначно определить состояние участка;
- K_m – диагностическая пригодность, доля событий, связанных с техническим состоянием оборудования;
- K_a – автономность реакции, доля типовых отклонений, для которых задано правило автоматической или полуавтоматической реакции.

Итоговый индекс цифровой готовности далее формализуется как взвешенная сумма нормированных показателей.

Веса показателей определяются экспертно и уточняются после обследования участка. В открытой публикации значения индексов могут приводиться в обезличенном виде или как относительные уровни: низкий, базовый, достаточный, высокий.

3. Применение к прессовому отделению Группы «Магнезит»

В качестве практического полигона рассматривается прессовое отделение огнеупорного производства, где эксплуатируются прессовое оборудование Laeis и роботы ABB. Для такого участка цифровой контур должен начинаться с событий, которые уже формируются оборудованием и не требуют вмешательства в технологический процесс. Это снижает риск для производства и позволяет быстро получить проверяемый научный результат.

Минимальный набор объектов включает пресс, робот, захват, оснастку, зону загрузки, зону выгрузки, защитный контур, операторскую панель и локальный архив событий. На первом уровне фиксируются состояния «работа», «ожидание», «наладка», «технологический останов», «аварийный останов», «обслуживание», «неопределенное состояние». На втором уровне уточняются причины: ожидание массы, ожидание робота, ожидание освобождения зоны, предупреждение контроллера, отказ датчика, авария привода, срабатывание защиты.

Такой подход позволяет получить несколько проверяемых методических результатов даже до построения сложных моделей машинного обучения. Во-первых, задается единая схема описания простоев и переходов состояний. Во-вторых, появляется возможность отделять технологические причины от причин технического состояния оборудования после заполнения первичного массива наблюдений. В-третьих, формируется база для последующей диагностики и предиктивного обслуживания. В-четвертых, появляется инструмент для научной аргументации: степень цифровой готовности можно обсуждать не качественно, а через определенный набор показателей.

Важно, что предложенная методика не требует раскрытия производственной тайны. Объем выпуска может быть заменен индексом загрузки; конкретные рецептуры – классом изделия; абсолютная длительность цикла – нормированным интервалом; структура коммерческого заказа – обезличенным типом производственной ситуации. Это делает методику пригодной для диссертационной работы и открытых публикаций.

4. Научная новизна и отличие от известных подходов

Большая часть современной литературы по цифровым двойникам и «умному» производству описывает либо общие архитектуры, либо высокотехнологичные производства с развитой цифровой инфраструктурой [9, 10]. В промышленной практике часто наблюдается иной случай: оборудование автоматизировано локально, но цифровой контур участка как управляемая система еще не сформирован. Поэтому перенос общих моделей цифрового двойника на прессовое отделение требует промежуточной методики.

Отличие предлагаемого подхода заключается в трех положениях.

Во-первых, единицей анализа выбран не весь завод и не отдельная машина, а технологически заверченный участок. Это соответствует практической логике внедрения: участок достаточно мал для опытной реализации, но достаточно сложен для научной постановки задачи.

Во-вторых, цифровая зрелость рассматривается через качество событийной модели. Для «темной фабрики» недостаточно знать, что оборудование имеет контроллер или робот. Необходимо доказать, что состояния участка наблюдаемы, события связаны с причинами, а данные пригодны для автоматического принятия решений.

В-третьих, ограничения открытой публикации встроены в методику. Для промышленных предприятий это принципиально: научная работа должна быть воспроизводимой и полезной, но не должна раскрывать коммерческую тайну. Введение признака открытости данных и переход к нормированным индексам позволяют сохранить научную проверяемость без публикации закрытых производственных сведений.

5. Практическая реализация первого прототипа

Первый прототип цифрового контура целесообразно реализовать как наблюдающую систему без управляющего воздействия на оборудование. Его задача – собрать факты, проверить структуру событий и показать ценность данных для инженерной службы. Прототип должен включать:

- карту оборудования и точек данных;
- справочник событий и состояний;
- модуль приема событий от доступных источников;
- хранилище нормализованных записей;

- панель наблюдения за состояниями участка;
- отчет по качеству данных и диагностической пригодности;
- процедуру выгрузки обезличенных показателей для научной работы.

Для инженерной службы такой прототип полезен тем, что показывает реальную картину доступности данных. Если часть критических событий отсутствует или записывается вручную, это фиксируется как разрыв цифрового контура. Если временные метки не согласованы, это становится задачей синхронизации. Если аварии есть, но причины не классифицированы, это становится задачей онтологического описания и уточнения справочников.

На втором этапе прототип может быть расширен до диагностического слоя. Здесь применимы подходы к машинному обучению в задачах качества и технического состояния [12, 13], но только после формирования достоверного набора событий. Преждевременное применение моделей машинного обучения к неполным или номинально заполненным журналам может дать формальный результат, но не создать инженерной ценности.

6. Модель наблюдаемости и показатели готовности

Для прессового отделения введем множество объектов O , множество параметров P , множество событий E , множество состояний S и набор правил R . Объектами являются пресс, робот, захват, оснастка, зоны загрузки и выгрузки, контроллеры, операторские панели и элементы безопасности. Состояние участка в момент времени t задается вектором $S(t)$, потому что простой прессы, ожидание робота, наладка, срабатывание защиты и обслуживание имеют разный производственный смысл.

Цифровая наблюдаемость означает возможность по потоку событий восстановить состояние $S(t)$ с заданной степенью достоверности. Для промышленной системы это практический критерий: если участок нельзя наблюдать, им нельзя устойчиво управлять в автономном режиме, даже если отдельные машины оснащены контроллерами. Полнота регистрации обязательных событий определяется по формуле

$$K_e = |E_{obs}|/|E_{req}|, \quad (2)$$

где E_{obs} – зарегистрированные события; E_{req} – события, необходимые для описания полного цикла.

Качество временной и идентификационной разметки события определяется по формуле

$$K_t = N_{valid}/N_{all}, \quad (3)$$

где N_{valid} – число записей с корректной временной меткой, источником и идентификатором объекта; N_{all} – общее число записей.

Наблюдаемость состояний участка оценивается по формуле

$$K_s = T_{observed}/T_{total}, \quad (4)$$

где $T_{observed}$ – длительность интервалов, для которых состояние участка определяется однозначно; T_{total} – общая длительность окна наблюдения. Эти показатели не раскрывают абсолютные объемы выпуска, рецептуры и структуру заказов, поэтому могут применяться в открытой публикации.

Для оценки готовности к «темной фабрике» используются пять индексов: полнота данных K_d , качество данных K_q , наблюдаемость состояний K_s , диагностическая пригодность K_m и автономность реакции K_a . Итоговый индекс цифровой готовности рассчитывается по формуле

$$K = w_d + w_q + w_s + w_m + w_a, \quad (5)$$

где w_d , w_q , w_s , w_m , w_a – весовые коэффициенты соответствующих показателей. Такая форма удобна для предприятия: она показывает, какой именно элемент цифрового контура ограничивает следующий шаг автоматизации.

7. Архитектура первого прототипа

Первый прототип цифрового контура целесообразно строить как наблюдающую систему без управляющего воздействия на оборудование. Его задача – проверить структуру событий, показать ценность данных для инженерной службы и подготовить основу для дальнейшей диагностики. Прототип включает карту оборудования, справочник событий и состояний, модуль приема

данных, хранилище нормализованных записей, панель состояния участка и отчет по качеству данных.

Интеграционный слой должен учитывать две группы источников. Первая группа – технологические источники: контроллеры пресса, робот АВВ, панели оператора, локальные архивы аварий и событий безопасности. Вторая группа – организационно-технические источники: сменные записи, данные обслуживания, отметки наладки, результаты инженерной проверки. Для прессовых машин с ПЛК и частотно-регулируемыми приводами важна корректная фиксация событий цикла [14], а для задач миграции и согласования данных полезен опыт постепенного переноса данных в ERP-проектах [15]. Связь прототипа с системой управления предприятием должна учитывать методологию стратегического, оперативного и интеллектуального управления [16–18].

В отличие от крупной MES-системы, первый прототип не должен сразу закрывать все производственные функции. Его минимальная ценность состоит в другом: выявить недостающие события, несогласованные временные метки, неполные коды причин и участки, где фактическое понимание инженера не подтверждается цифровым следом. Такой результат уже является научно значимым, потому что переводит обсуждение цифровой зрелости из качественной оценки в измеряемую модель.

8. Связь с технологией, ТОиР и качеством

Прессовое отделение является точкой пересечения технической готовности оборудования и стабильности качества формуемых изделий. Для MgO-C материалов важны свойства сырья, углеродная составляющая, условия уплотнения и последующая термическая обработка [19–21]. Поэтому цифровой контур не должен ограничиваться авариями пресса или робота. Он должен фиксировать стабильность цикла, повторяемость состояний, частоту наладок, превышение нормированной длительности ожидания и срабатывания защит.

Связь с ТОиР строится через диагностические события. Если предупреждение повторяется до аварии, оно должно быть связано с узлом, причиной и сервисным действием. Если после обслуживания предупреждение исчезает, событие подтверждает результат действия. Если предупреждение повторяется после обслуживания, это сигнал для уточнения причины или проверки регламента. Современные обзоры по предиктивному обслуживанию и мониторингу состояния показывают, что модели машинного обучения дают устойчивый эффект только при достаточном качестве исходных данных [22–24].

Для роботизированной части участка перспективным является сочетание данных и инженерного знания [25]. Робот в прессовом отделении часто выступает посредником между технологическим оборудованием и логистикой: ошибка робота может выглядеть как простой пресса, а технологическое ожидание может ошибочно трактоваться как проблема робота. Поэтому диагностическая модель должна учитывать взаимодействие пресса, робота, оснастки, зоны безопасности и оператора, а не только отдельные аварии.

9. Ограничения открытой публикации и апробация

Для диссертационной работы на материале действующего предприятия необходимо заранее разделить научную воспроизводимость и производственную конфиденциальность. Не подлежат открытой публикации абсолютные объемы выпуска, структура заказов, конкретные рецептуры, закрытые режимы, экономические показатели, адреса промышленных тегов, настройки контроллеров и детальные графики загрузки оборудования. Эти данные могут использоваться во внутреннем контуре исследования при наличии разрешения, но в статье заменяются нормированными показателями.

Допустимыми для открытой публикации являются типовая архитектура цифрового контура, классы событий, классы состояний, формулы нормированных индексов, логика обследования, обезличенные примеры переходов состояний и общие выводы о применимости методики. Для каждого показателя целесообразно фиксировать уровень доступа: открытый, внутренний инженерный, внутренний управленческий или закрытый.

Опытную апробацию методики предлагается проводить на одной прессово-роботизированной ячейке. На первом этапе составляется паспорт источников данных и справочник событий. На втором этапе в согласованном окне наблюдения собираются события без вмешательства в тех-

нологический процесс. На третьем этапе инженеры цеха и ремонтной службы сопоставляют цифровую классификацию состояний с фактической производственной ситуацией. На четвертом этапе рассчитываются индексы полноты, качества времени, наблюдаемости и диагностической пригодности. До заполнения первичного массива наблюдений Р0 апробация описывается как планируемая методическая проверка; численные выводы о снижении простоев, росте качества или экономическом эффекте не формулируются. Критерием успешности является не заявленный экономический эффект, а воспроизводимость методики и выявление разрывов цифрового контура.

10. Обсуждение результатов

Предложенная методика занимает промежуточное место между общей концепцией цифрового двойника и локальной задачей сбора сигналов. В литературе по цифровым двойникам подчеркиваются моделирование, синхронизация с физическим объектом и поддержка решений [9, 10]. Однако для действующего прессового отделения цифровой двойник не может быть построен без предварительной нормализации событий, проверки качества данных и формализации состояний.

Научная новизна состоит в том, что объектом исследования становится не отдельная машина и не весь завод, а технологически завершенная прессово-роботизированная ячейка как носитель цифрового следа. Дополнительно вводится критерий минимальной достаточности: в контур включаются только те события, состояния, параметры и правила, которые необходимы для восстановления состояния участка и последующей диагностики. Практическая значимость состоит в возможности начать внедрение с небольшого наблюдающего прототипа, который не меняет контур управления, но после заполнения Р0 должен дать измеримые показатели готовности к более автономному режиму.

Для диссертации по специальности 2.3.3 эта методика выполняет роль базового результата и поддерживает первое положение защиты о формировании минимально достаточного событийного цифрового контура: объект – модель – методика – прототип – апробация – оценка. Такой порядок сохраняет инженерную основу работы и одновременно переводит ее в научную форму. Цифровой контур в этой постановке рассматривается не как локальный набор сигналов, а как часть системы управления производством.

Заключение

Предложена методика формирования минимально достаточного событийного цифрового контура прессового отделения огнеупорного производства как основы перехода к перспективной модели «темной фабрики». Методика включает определение границ участка, объектную модель, классификацию событий, нормализацию данных, онтологическое описание ресурсов, интеграционный слой и систему нормированных показателей цифровой готовности. На материале прессового оборудования Laeis и роботов АВВ обосновано, что научно корректный переход к автономизации должен начинаться с наблюдаемости состояний и качества данных, а не с декларации полной безлюдности. Дополнительно сформулированы математическая постановка цифровой наблюдаемости, архитектура первого наблюдающего прототипа мониторинга, классификатор состояний, показатели цифровой зрелости, правила защиты коммерческой информации и план опытной апробации. Методика может использоваться в диссертационной работе, при обследовании производственного участка и при создании первого прототипа цифрового мониторинга в условиях Группы «Магнезит». До заполнения Р0 статья остается методической и не содержит заявлений о доказанном экспериментальном, производственном или экономическом эффекте.

Список литературы

1. Стратегическое и оперативное управление промышленными предприятиями / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко, А.А. Шестаков Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2021. 325 с.
2. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.И. Дранко, О.В. Логиновский, А.А. Шестаков и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. DOI: 10.12737/1087996
3. Kundu S., Sarkar R. MgO-C Refractories: A Detailed Review of These Irreplaceable Refractories in Steelmaking // Interceram – International Ceramic Review. 2021. Vol. 70, no. 3. P. 46–55. DOI: 10.1007/s42411-021-0457-9

4. Thermal and mechanical properties of commercial MgO-C bricks / E.R. Benavidez, E. Brandaleze, Y.S. Lagorio et al. // *Matéria* (Rio de Janeiro). 2015. Vol. 20, no. 3. P. 571–579. DOI: 10.1590/S1517-707620150003.0058
5. Refractories 4.0 / R. Steiner, G. Lammer, C. Spiel, C. Jandl // *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2017. Vol. 162, no. 11. P. 514–520. DOI: 10.1007/s00501-017-0675-7
6. Белякова В.А., Логиновский О.В., Шинкарев А.А. Онтологический инжиниринг в управлении ресурсом оборудования наукоемкого производства // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 3. С. 26–41. DOI: 10.14529/ctcr250303
7. Логиновский О.В., Белякова В.А. Модель управления наукоемким производством на основе технологии цифровых двойников // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 2. С. 95–106. DOI: 10.14529/ctcr250209
8. Разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов / О.В. Логиновский, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2024. Т. 24, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr240301
9. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143
10. Digital twins-based flexible operating of open architecture production line for individualized manufacturing / J. Leng, Z. Chen, W. Sha et al. // *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 53. P. 101676. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101676
11. Integrating process management and event processing in smart factories: A systems architecture and use cases / R. Seiger, L. Malburg, B. Weber, R. Bergmann // *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 63. P. 575–592. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.05.012
12. Tercan H., Meisen T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022. Vol. 33, no. 7. P. 1879–1905. DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8
13. Эволюция использования и применения машинного обучения и искусственного интеллекта в разработке корпоративных информационных систем и в системах поддержки принятия решений / А.А. Шинкарев, М.В. Ядрышникова, О.В. Логиновский и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 4. С. 17–42. DOI: 10.14529/ctcr250402
14. Sowmiya M. Monitoring and control of PLC based VFD fed three phase induction motor for powder compacting press machine // *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. 2013. P. 90–92. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481128
15. Логиновский О.В., Голубева О.Л. Модель инкрементной миграции данных в проектах внедрения ERP-систем // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 3. С. 64–76. DOI: 10.14529/ctcr250306
16. Formation of the methodology of strategic and operational management of industrial enterprises in the conditions of global instability / O.V. Loginovskiy, A.V. Hollay, A.L. Shestakov, K.A. Korennaya // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2022. № 2. С. 73–94. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.2.04
17. The mechanisms of smart management for industrial enterprises / V.N. Burkov, O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Hollay // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2020. № 1. С. 59–73. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.04
18. Логиновский О.В., Шинкарев А.А., Коваль М.Е. Разработка архитектуры систем информационного поиска на основе очередей сообщений в корпоративных информационных системах // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2021. № 1. С. 119–140. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.07
19. Mukherjee S., Pramanik S., Mukherjee S. A Comprehensive Review of Recent Advances in Magnesite Carbon Refractories // *Interceram – International Ceramic Review*. 2014. Vol. 63, no. 3. P. 90–98. DOI: 10.1007/BF03401039
20. Ewais E.M.M. Carbon Based Refractories // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2004. Vol. 112, no. 1310. P. 517–532. DOI: 10.2109/jcersj.112.517

21. Improved thermal shock stability and oxidation resistance of low-carbon MgO-C refractories with introduction of SiC whiskers / Y. Chen, J. Ding, C. Deng, C. Yu // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49, no. 16. P. 26871–26878. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.224
22. From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0 / R. Rosati, L. Romeo, G. Cecchini et al. // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34. P. 107–121. DOI: 10.1007/s10845-022-01960-x
23. Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance – A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. Vol. 40. P. 53–67. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.004
24. Surucu O., Gadsden S.A., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 221. P. 119738. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738
25. Data-driven and Knowledge-based predictive maintenance method for industrial robots for the production stability of intelligent manufacturing / X. Wang, M. Liu, C. Liu et al. // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 234. P. 121136. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121136

References

1. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.A. *Strategicheskoe i operativnoe upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami* [Strategic and Operational Management of Industrial Enterprises]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2021. 325 p. (In Russ.)
2. Dranko O.I., Loginovskiy O.V., Shestakov A.A., Gollay A.V., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures]. Moscow: Infra-M, 2020. 450 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
3. Kundu S., Sarkar R. MgO-C Refractories: A Detailed Review of These Irreplaceable Refractories. *InterCeram – International Ceramic Review*. 2021. DOI: 10.1007/s42411-021-0457-9
4. Benavidez E.R., Brandaleze E., Lagorio Y.S., Gass S.E., Tomba Martinez A.G. Thermal and mechanical properties of commercial MgO-C bricks. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2015;20(3):571–579. DOI: 10.1590/S1517-707620150003.0058
5. Steiner R., Lammer G., Spiel C., Jandl C. Refractories 4.0. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2017;162(11):514–520. DOI: 10.1007/s00501-017-0675-7
6. Beliakova V.A., Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A. Ontology-based equipment resource control in knowledge-intensive manufacturing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):26–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250303
7. Loginovskiy O.V., Beliakova V.A. Digital twin-based management model for high-tech production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):95–106. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250209
8. Loginovskiy O.V., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliaikov A.E., Beliakova V.A. Development of a digital twin of the control system test bench for digital instrument transformers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240301
9. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*. 2020;8:21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143
10. Leng J., Chen Z., Sha W., Lin Z., Lin J., Liu Q. Digital twins-based flexible operating of open architecture production line for individualized manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*. 2022;53:101676. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101676
11. Seiger R., Malburg L., Weber B., Bergmann R. Integrating process management and event processing in smart factories: A systems architecture and use cases. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022;63:575–592. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.05.012
12. Tercan H., Meisen T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022;33(7):1879–1905. DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8
13. Shinkarev A.A., Iadryshnikova M.V., Loginovskiy O.V., Lazareva S.A., Gubin V.M. Evolution of usage and application of machine learning and artificial intelligence in the development of enterprise information systems and in decision support systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):17–42. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250402

14. Sowmiya M. Monitoring and control of PLC based VFD fed three phase induction motor for powder compacting press machine. In: *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. 2013. P. 90–92. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481128
15. Loginovskiy O.V., Golubeva O.L. Model of incremental data migration in ERP implementation projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):64–76. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250306
16. Loginovskiy O.V., Holloy A.V., Shestakov A.L., Korennaya K.A. Formation of the methodology of strategic and operational management of industrial enterprises in the conditions of global instability. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2022;(2):73–94. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.2.04
17. Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Holloy A.V. The mechanisms of smart management for industrial enterprises. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2020;(1):59–73. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.04
18. Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A., Koval M.E. Development of architecture of message queue based information search systems for enterprise information systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2021;(1):119–140. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.07
19. Mukherjee S., Pramanik S., Mukherjee S. A Comprehensive Review of Recent Advances in Magnesia Carbon Refractories. *Interceram – International Ceramic Review*. 2014;63(3):90–98. DOI: 10.1007/BF03401039
20. Ewais E.M.M. Carbon Based Refractories. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2004;112(1310):517–532. DOI: 10.2109/jcersj.112.517
21. Chen Y., Ding J., Deng C., Yu C. Improved thermal shock stability and oxidation resistance of low-carbon MgO-C refractories with introduction of SiC whiskers. *Ceramics International*. 2023;49(16):26871–26878. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.224
22. Rosati R., Romeo L., Cecchini G., Tonetto F., Viti P., Mancini A., Frontoni E. From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023;34:107–121. DOI: 10.1007/s10845-022-01960-x
23. Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023;40:53–67. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.004
24. Surucu O., Gadsden S.A., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. *Expert Systems with Applications*. 2023;221:119738. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738
25. Wang X., Liu M., Liu C., Ling L., Zhang X. Data-driven and Knowledge-based predictive maintenance method for industrial robots for the production stability of intelligent manufacturing. *Expert Systems with Applications*. 2023;234:121136. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121136

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Гордеев Иван Константинович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ik.gordeev@ya.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Ivan K. Gordeev, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ik.gordeev@ya.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026

The article was submitted 12.01.2026