

УДК 004:658.51
DOI 10.17513/snt.40442

МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В РЕЖИМЕ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Холопов В.А., Киселев Д.С., Володина А.М.

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва,
e-mail: kiselevmirea@gmail.com

В статье предложен метод формализации технических, технологических и режимных параметров производственного комплекса, реализованного средствами инфологического анализа. Целью работы является разработка альтернативного метода формализации параметров технологической линии, функционирующей в режиме дискретного поточного многономенклатурного производства, на основе инфологического анализа с применением средств реляционной модели данных в нотации IDEF1X. Авторами показана необходимость перехода от традиционных функциональных схем автоматизации к более гибким подходам, способным учитывать динамически меняющиеся производственные условия и разнообразие номенклатуры изделий, а также сложность критериев переналадки оборудования и вариативность технологических процессов. Проведен сравнительный анализ функциональной схемы автоматизации и инфологического анализа по ключевым критериям, таким как гибкость, структурированность данных, возможность интеграции и автоматизации проверки данных на ошибки. Результаты исследования подтверждают преимущества предложенного подхода, выраженные в сокращении времени адаптации модели к изменениям производственных условий, улучшении структуризации данных, повышении степени автоматизации формализации и расширении возможностей интеграции с системами управления производством и цифровыми сервисами. Предложенный метод обеспечивает эффективную унификацию и формализацию технических, технологических и режимных параметров, повышая точность и оперативность производственного планирования и управления в условиях цифровой трансформации промышленных предприятий.

Ключевые слова: формализация параметров, инфологический анализ, функциональная схема автоматизации, реляционная модель данных, дискретное производство

METHOD OF FORMALIZING THE PARAMETERS OF A FLOW TECHNOLOGICAL PROCESS LINE FUNCTIONING IN THE MODE OF MULTI-PRODUCT DISCRETE MANUFACTURE

Kholopov V.A., Kiselev D.S., Volodina A.M.

MIREA – Russian Technological University, Moscow, e-mail: kiselevmirea@gmail.com

The article proposes a method for formalizing technical, technological, and operational parameters of a production complex using infological analysis. The primary objective of this research is to develop an alternative approach for formalizing parameters of a technological line operating under discrete-flow multi-product manufacturing conditions, applying infological analysis with a relational data model implemented in the IDEF1X notation. The authors substantiate the necessity of transitioning from traditional functional automation diagrams to more flexible methodologies capable of accommodating dynamically changing production conditions, a broad product range, complexity of equipment changeover criteria, and variability in technological processes. A comparative analysis between functional automation diagrams and infological analysis is conducted based on key criteria such as flexibility, data structuring capability, integration possibilities, and automated data integrity verification. The findings confirm the advantages of the proposed method, including reduced adaptation time to changing manufacturing conditions, improved data structuring, enhanced automation levels for parameter formalization, and expanded integration potential with production management systems and digital services. The proposed method effectively unifies and formalizes technical, technological, and operational parameters, significantly enhancing the accuracy and responsiveness of production planning and management amid the digital transformation of industrial enterprises.

Keywords: parameter formalization, infological analysis, relational data model, functional automation diagrams, discrete manufacturing

Введение

Наряду с высокими темпами развития информационного общества и периодом цифровой трансформации промышленные предприятия проходят этап осовременивания путем активного внедрения комплексов новейших технологий: от систем искусственного интеллекта, использующих алгоритмы машинного обучения для оп-

тимизации производственных процессов, до блокчейн-платформ с криптографическими методами верификации данных для отслеживания цепочек поставок, а также IoT-устройств, работающих на основе алгоритмов потоковой обработки данных в режиме реального времени для мониторинга оборудования. Каждая автоматизированная система на производственном пред-

приятию обладает уникальным функциональным набором и специализированными алгоритмами управления, обеспечивающими конкурентные преимущества и достижение целевых показателей производства [1].

С расширением функциональности систем и выпускаемой предприятиями продукции увеличивается число номенклатурных позиций [2]. Планирование дискретного поточного многономенклатурного производства, такого как гальваническая обработка изделий, требует одновременного учета множества параметров и имеет ключевое значение. Важность этого этапа связана с необходимостью обеспечения непрерывности производственного процесса, минимизации простоев оборудования и повышения производительности. Планирование также требует учета многочисленных динамически изменяемых факторов, таких как длительность операций, последовательность выполнения процессов, загрузка оборудования, а также своевременная реакция на возможные сбои и изменения в производственной программе [3, 4].

Современные исследования различных авторов демонстрируют широкий спектр методологических подходов к решению задач производственного планирования и управления, включая как классические методы, так и их комплексные комбинации. Так, например, исследование авторов D. Ivanov, A. Dolgui и B. Sokolov рассматривает трансформацию задач планирования производства в условиях Индустрии 4.0 и облачных производственных систем. Выводы сформулированы о том, что современные производственные системы в условиях Индустрии 4.0 нуждаются в обновлении подходов к планированию, так как они становятся все более гибкими. Как считают авторы, использование комбинационных подходов позволяет совершенствовать возможность адаптирования к постоянным изменениям и обновляемым требованиям вместо традиционных расчетов и построения графиков под задачи производств. Однако для таких решений необходимы сложные алгоритмы и точные структурированные данные, на которые наблюдается дефицит. И поэтому актуально предлагать и использовать методы для формализации параметров для производств с различными динамическими условиями и ограничениями. Имея формализованные параметры с характеристикой производства, имеется возможность создавать новые алгоритмы оптимизации производственных процессов [5]. Этими же авторами представлено обзорное исследование применения методов управления для планирования в производственных системах Индустрии 4.0 на примере про-

цессов поставок. Рассмотрен детерминированный принцип максимума Понтрягина, который позволяет формализовать задачи планирования как траектории управления динамическими системами. Результаты их работы обладают рядом преимуществ, такими как детализированное представление непрерывных процессов и возможность установления сложносоставных ограничений с перспективой применения в управлении информационными потоками. Однако определены сложности и нецелесообразность применения для моделирования дискретных процессов [6].

Arsyad Junaiddin и его коллеги решают задачу оптимизации производственного расписания на загрузку ресурсов в производственный участок. Исследование демонстрирует применимость связи математических моделей и линейного программирования для задач планирования и управления в дискретном производстве. Однако при анализе предложенного решения было определено, что не учтены возможности расширения модельного ряда продукта и не учтены меняющиеся переменные [7]. Задачу для управления ресурсами и устойчивостью производства также решают авторы Lingxin Wang, Rosa Abbou и Catherine da Cunha для медицинской отрасли. Ими предложена иерархическая модель планирования производства, которая подтвердила гипотезу о повышении эффективности и гибкости, включая сокращение простоев исполнительного оборудования при использовании метода. Несмотря на благоприятные результаты в исследовании, модель нуждается в адаптации временных параметров и ввода ограничений, особенно при расширении для других отраслей [8].

Современные достижения в технологиях машинного обучения предлагают различные решения задач производственного планирования интеллектуальных методов. Метаэвристические подходы, включая генетические алгоритмы и оптимизацию роением частиц, показывают эффективность в минимизации makespan для NP-сложных задач типа JSSP [9, 10]. Интеграция методов машинного обучения с традиционными алгоритмами позволяет достигать баланса зависимости между частотой перепланирования и минимизацией задержек в условиях ограниченных ресурсов [11]. Перспективным направлением является сочетание MBSE-методологий с формальными методами верификации, обеспечивающее графическое представление ограничений и автоматизированный поиск решений [12]. Особый интерес представляет применение нейронных сетей и обучения с подкреплением для мно-

гокритериальной оптимизации в условиях Индустрии 4.0. Практические результаты исследований подтверждают преимущества таких методов, включая сокращение временных затрат и адаптацию к динамическим изменениям производства. Однако отмечаются ограничения, связанные с вычислительной сложностью, масштабируемостью и необходимостью качественных данных для обучения моделей. Исследования авторов о применении искусственного интеллекта и его множеств на этапах планирования производственных процессов подтверждают актуальность задачи в разработке гибридных подходов, сочетающих достоинства различных методов применительно к специфике конкретных производственных сред при условии формализованных данных.

Для формализации требований к MES системам авторами M. Witsch и B. Vogel-Neuser предложен язык MES-ML, объединяющий три взаимосвязанных представления: техническую систему, производственные процессы и IT-функции. Его ключевым преимуществом является использование адаптированной BPMN нотации с цветовой кодировкой и связями [13].

Авторы Aljosha Kocher, Luis Miguel Vieira da Silva, Alexander Fay также предложили метод, сочетающий онтологии для описания возможностей (capabilities) и навыков (skills) с использованием нотации BPMN для оркестрации процессов. Его применение позволяет абстрагировать производственные правила от физического оборудования, обеспечивая их повторное применение при изменении состава модулей. Ключевым преимуществом является возможность интеграции с IT-функциями через стандартные элементы BPMN. Это подтверждено на примере системы Festo MPS 500. Однако выбор навыков для исполнения требует ручного вмешательства, а верификация сложных процессов остается открытой проблемой [14].

В работе E. Andre, S. Liu и соавт. проведен систематический обзор методов формализации параметров устройств на UML языке через диаграмму состояний, направленных на автоматическую верификацию. Авторы классифицируют подходы на трансляционные и семантические, анализируя их преимущества и ограничения. Особое внимание уделено поддержке синтаксических элементов UML, включая ортогональные состояния, псевдосостояния и семантику run-to-completion. Отмечается, что многие инструменты верификации недоступны в долгосрочной перспективе, а это снижает их практическую применимость. В качестве перспектив в исследовании выделены разра-

ботка полной формальной семантики, интеграция количественных расширений и улучшение инструментальной поддержки [15].

Анализ показал, что для каждого из рассматриваемых методов основополагающим этапом является формализация параметров производственного процесса. Подходы к задаче разнообразны и осуществляются путем анализа и разработки концептуальных моделей или функциональных схем. Так, например, для достижения целевых задач работы В.А. Гурова и К.О. Оковитой акцентируют внимание на использовании функциональной схемы автоматизации на этапе формализации параметров рассматриваемых производственных систем. В обеих работах строятся автоматизированные системы управления, для каждой из которых важно представление о производственных параметрах [16, 17]. Традиционным подходом формализации параметров при построении автоматизированных систем управления принято создание функциональной схемы автоматизации. Применение функциональных схем автоматизации в обоих исследованиях подчеркивает их значимость как инструмента унификации параметров в производственных системах с различной номенклатурой технических, технологических и режимных потоков.

Несмотря на существующие преимущества каждого из методов, необходимо отметить их определенные ограничения при использовании в конкретных условиях многономенклатурного производства. Функциональные схемы автоматизации, хоть и являются традиционными и широко применяются в серийном производстве, демонстрируют явные ограничения при использовании в условиях высокой вариативности и неопределенности параметров, которые наблюдаются в дискретных поточных многономенклатурных производствах, таких как обработка изделий гальваническими покрытиями. А также функциональные схемы автоматизации не востребованы в процессах на этапах сборки в машиностроении, станкостроении, роботостроении, где решающую роль играют умные устройства. Функциональные схемы автоматизации затрудняют формализацию динамически меняющихся параметров.

Важным выводом из анализа становится то, что для эффективного управления дискретными поточными многономенклатурными производственными комплексами требуется применение более гибких подходов к формализации и структурированию данных. Эту задачу эффективно решает инфологический анализ с использованием модели данных в нотации IDEF1X, предлагае-

мый в настоящем исследовании. Такой подход обеспечивает структурированное представление всех необходимых параметров и их взаимосвязей, позволяет значительно упростить процессы управления и автоматизации, а также быстро адаптироваться к изменениям производственной программы и технологических режимов. Таким образом, литературный анализ подчеркивает необходимость и актуальность предлагаемого в статье метода инфологического анализа как инновационного и высокоэффективного подхода к решению сложных задач формализации и управления параметрами в условиях многономенклатурного дискретного поточного производства.

Целью исследования является разработка метода формализации параметров исполнительных элементов технологической линии обработки изделий гальваническими покрытиями на основе инфологического анализа в нотации IDEF1X для создания реляционной модели данных, обеспечивающей унификацию параметров и интеграцию данных в алгоритмы линейного программирования на этапе составления производственного расписания, а также повышение эффективности планирования в условиях дискретного поточного многономенклатурного производства.

Исследование направлено на решение следующих задач:

1. Формализовать параметры исполнительных элементов фрагмента технологической линии обработки материалов гальваническими покрытиями через функциональную схему автоматизации и инфологический анализ.

2. Выполнить сравнительный анализ результатов формализации.

3. Разработать алгоритм создания реляционной модели данных формализации параметров производственного комплекса, используя инфологический анализ.

4. Оценить применимость предложенного подхода к проектированию систем планирования дискретных поточных многономенклатурных производств и интеграции данных в алгоритмы линейного программирования на этапе составления производственного расписания.

Научной значимостью исследования является нахождение более эффективного метода формализации параметров для построения информационно-управляющих систем

дискретного поточного многономенклатурного производства в отличие от традиционных функциональных схем автоматизации. Практическая значимость исследования заключается в создании методологического аппарата для системной формализации параметров производства обработки изделий гальваническими покрытиями, обеспечивающего переход к цифровому планированию и управлению технологическими процессами. В рамках данного исследования выдвигается гипотеза о том, что применение инфологического анализа для формализации параметров дискретного поточного многономенклатурного производства позволит унифицировать технические, технологические и режимные параметры комплекса обработки изделий гальваническими покрытиями, используемые на этапе планирования технологических процессов, в единую реляционную модель данных.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является дискретный поточный многономенклатурный производственный процесс обработки изделий гальваническими покрытиями. Особое внимание в работе уделяется процессу формализации параметров на этапе проектирования информационно-управляющей системы производства и рассматривается фрагмент производственного комплекса (рис. 1).

Для достижения поставленных в исследовании задач рассматриваются два подхода:

1. Функциональный анализ для разработки функциональной схемы автоматизации, описываемой в виде множества как

$$SFSA = \{O, A, B, C, D, E, F\}, \quad (1)$$

где SFSA – описание технологических операций; O – производственная операция; A – технические параметры операции; B – технологические параметры операции; C – режимные параметры операции; D – контроллеры и исполнительные устройства; E – датчики и измерительные каналы; F – функциональные связи между компонентами.

$$R = \{AO, AI, P, DO, DI\}, \quad (2)$$

где R – технологические контуры; AO – аналоговый выходной сигнал; AI – аналоговый входной сигнал; P – правила и алгоритмы обработки; DO – дискретный выходной сигнал; DI – дискретный входной сигнал.

$$M_{sig} = [m_{ij}]_{n \times n}, m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если устройство } i \text{ связано с устройством } j \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

где M – матрица сигнальных связей.

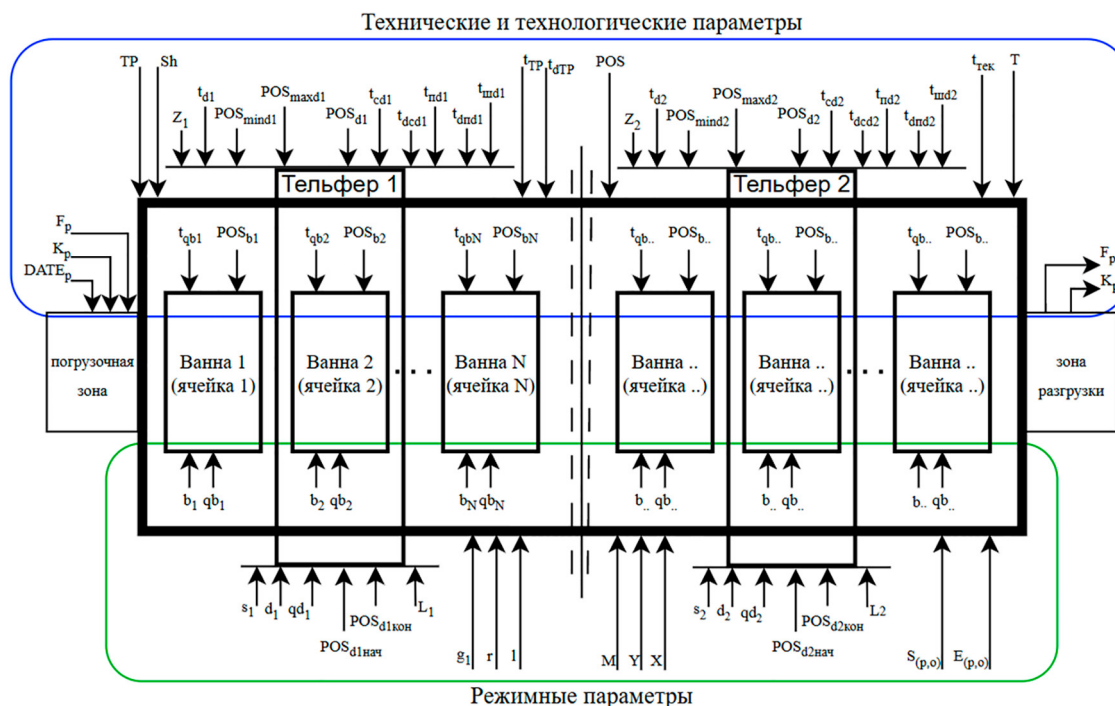


Рис. 1. Фрагмент функциональной структурной схемы объекта исследования
Источник: составлено авторами

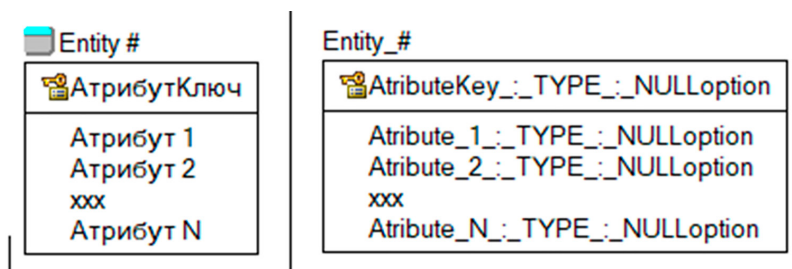


Рис. 2. Макет сущностей реляционной модели данных
Источник: составлено авторами

2. Инфологический анализ для разработки реляционной модели данных (рис. 2), описываемой в виде множества как

$$M = \{E, A, R, \Phi\}, \quad R \subseteq E \times E, \quad (4)$$

где M – реляционная модель; E – сущность; A – атрибут; R – связь и ограничение; Φ – бизнес-правила.

Результаты исследования и их обсуждение

Производственный комплекс представляет собой три независимые технологические линии, на которых осуществляется обработка изделий восемью типами гальванических покрытий, требующих строгого контроля технических, технологических и режимных параметров, таких как тем-

пература, концентрация химических растворов, длительность обработки, загрузка ванн, время выполнения действия, логистика тельферов, скорость перемещения, координатные позиции, текущие состояния исполнительных устройств.

Множество технологических линий описывается следующим образом:

$$GTL = \{g_1, g_2, g_3\}, \quad (5)$$

где GTL – гальваническая технологическая линия); g_1, g_2, g_3 – индексы каждой технологической линии.

Множество типов гальванических покрытий описывается следующим образом:

$$TP = \{TP_1, TP_2, \dots, TP_8\}, \quad |TP| = 8, \quad (6)$$

где TP – технологический процесс.

Каждая технологическая линия производственного комплекса оснащена двумя тельферами для транспортировки изделий между операциями и ячейками (ваннами) для выполнения операций обработки.

Множество тельферов для транспортировки изделий выражается как

$$D = \{d_{k,1}, d_{k,2}\}, k \in GTL, \quad (7)$$

где D – тельфер; d – индекс тельфера; k – номер линии тельфера.

Множество ячеек (ванн) для обработки материалов выражается как

$$B = \{b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}, \dots, b_{kn}\},$$

$$k \in GTL, n \in POS_b, \quad (8)$$

где B – ячейка (ванна); b – индекс ячейки (ванны); k – номер линии тельфера; n – номер позиции размещения ячейки (ванны).

Формализация параметров означает описание и структурирование всех возможных характеристик производственного комплекса, которое выражается в виде супермножества:

$$W = \{TGL, TP, D, B, \dots\}. \quad (9)$$

На основе описания объекта исследования и исходных данных множеств параметров была составлена функциональная схема автоматизации исполнительных элементов технологической линии [18, 19]. Фрагмент полученной функциональной схемы для дискретного поточного многоно-

менклатурного производства представлен на рис. 3.

Функциональная схема автоматизации широко применяется в серийном и массовом производстве, поскольку хорошо подходит для неизменных процессов с четкими и предсказуемыми параметрами и связями между элементами оборудования. Однако применение функциональной схемы автоматизации в дискретном поточном многономенклатурном производстве сталкивается с рядом существенных ограничений. Многономенклатурное производство характеризуется постоянными изменениями технологических процессов, большим разнообразием изделий и необходимостью гибкой перенастройки оборудования. В таких условиях функциональная схема автоматизации не способна эффективно формализовать и учитывать такие критически важные параметры, как вариативность технологических режимов, параметры переналадки, нестандартные промежутки времени между операциями и временные зависимости, возникающие при обработке различных типов продукции.

Ниже приведены примеры параметров, которые трудно представить при помощи функциональной схемы автоматизации:

1. Длительность переналадки оборудования на другой тип продукции.
2. Временные окна для профилактического обслуживания оборудования.
3. Параметры, связанные с неопределенностью спроса и срочными заказами.

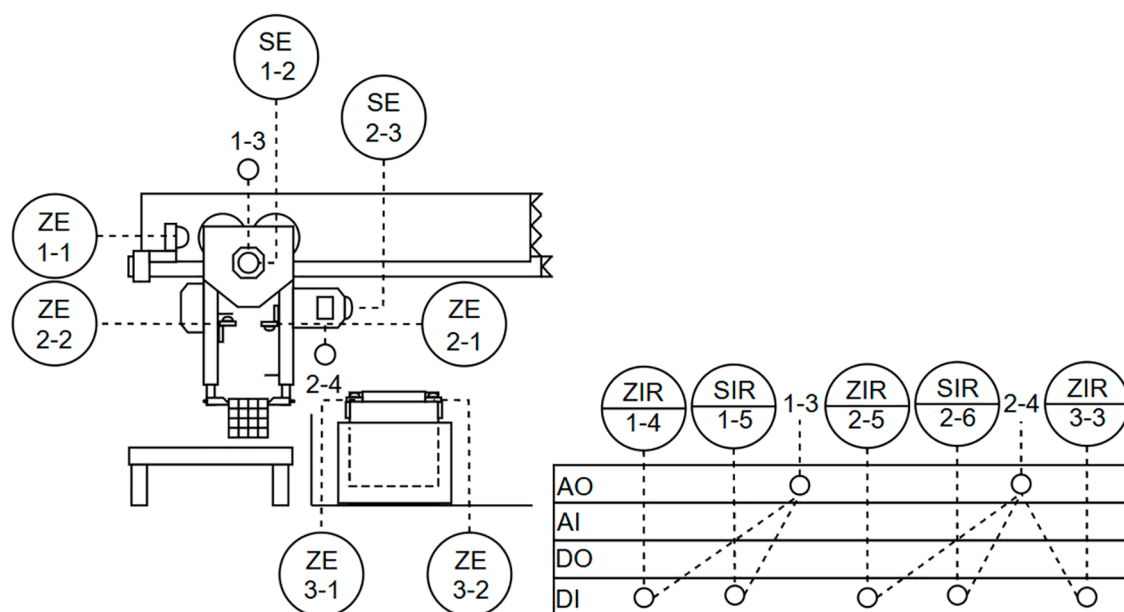


Рис. 3. Фрагмент функциональной схемы автоматизации исполнительных элементов производственного комплекса обработки изделий гальваническими покрытиями
Источник: составлено авторами

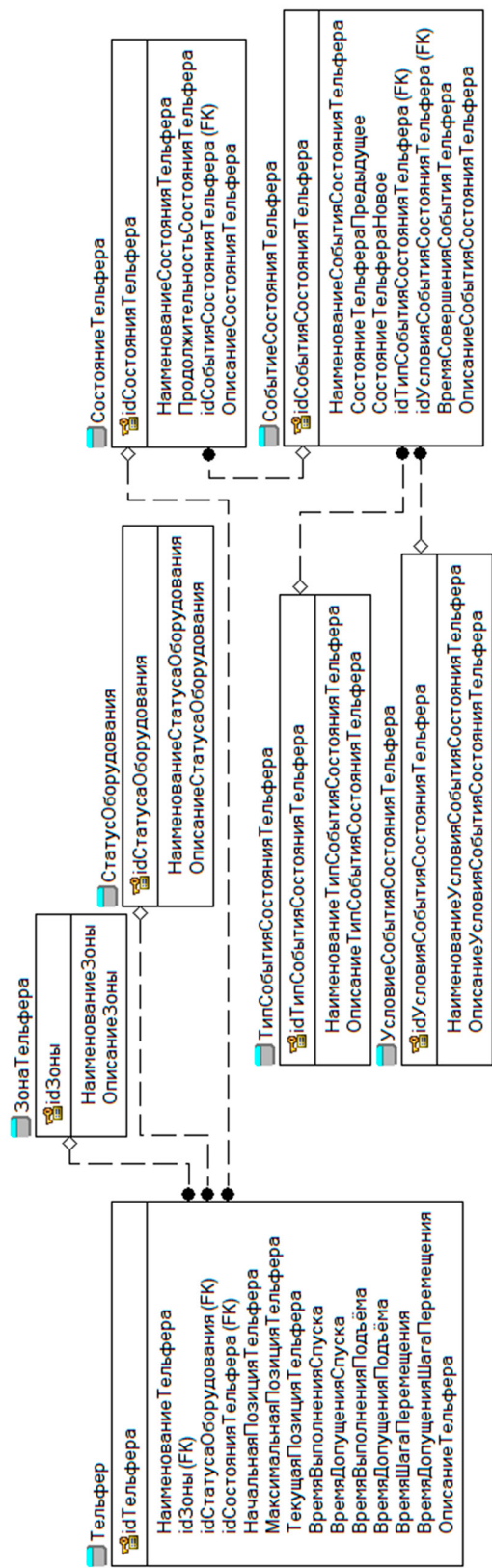


Рис. 4. Фрагмент логической модели данных параметров исполнительных элементов технологической линии в нотации IDEF1X
Источник: составлено авторами

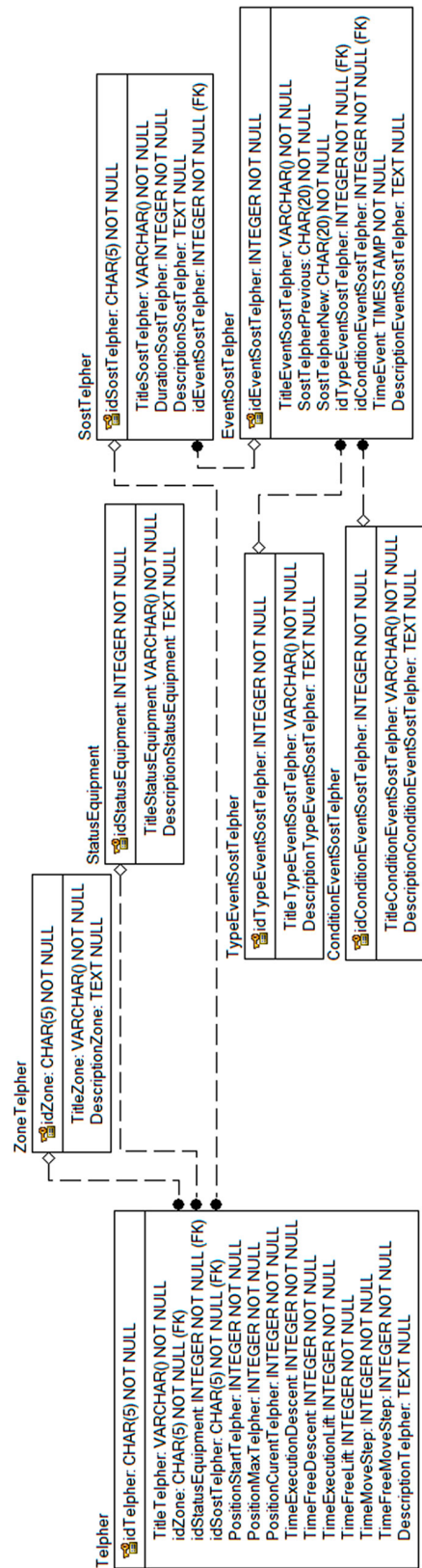


Рис. 5. Фрагмент даталогической модели данных параметров исполнительных элементов технологической линии в нотации IDEF1X
Источник: составлено авторами

Эти ограничения делают метод формализации параметров через функциональную схему автоматизации недостаточно гибкой для многономенклатурного дискретного производства и требуют применения более универсального подхода, такого как инфологический анализ.

Необходимость одновременного учета множества параметров и составления расписания работы исполнительных устройств значительно усложняет задачи планирования и управления. В связи с этим требуется использовать специальный подход к их формализации и автоматизации, результат которого минимизирует время простоя и потери производительности. Для решения научной задачи предложен метод инфологического анализа формализации параметров с использованием нотации IDEF1X. Инфологический анализ предлагает системный подход к формализации данных производственного процесса с точки зрения информационных потоков. Он позволяет структурировать множество параметров, идентифицировать сущности, определять атрибуты и связи между ними с помощью модели данных нотации IDEF1X. А это значительно упрощает последующие этапы автоматизации и разработки алгоритмов управления, обеспечивая гибкость и удобство адаптации к новым задачам и переменным, а также для возможности интеграции с линейным программированием [20]. На рис. 4 представлен фрагмент формализованных переменных производственного комплекса обработки изделий гальваническими покрытиями. А именно, были идентифицированы

сущности, определены атрибуты для одного из исполнительных элементов технологической линии – тельфер, осуществляющий транспортировку изделий в процессе их обработки.

На даталогической модели каждому из атрибутов был присвоен тип данных и созданы ограничения (рис. 5).

Типы данных у атрибутов определялись исходя из целевых установок для хранения значений и записей о параметрах. Даталогическая модель является основополагающей для создания алгоритмов планирования, обеспечивая формализацию параметров производства через нормализованный словарь переменных. Он включает уникальные идентификаторы, семантические описания, стандартные единицы измерения и допустимые диапазоны значений. Для терминологической унификации и соответствия стандартам модель дополнена тезаурусом (табл. 1), который устанавливает однозначные связи между техническими параметрами и их формальными представлениями. Такой подход гарантирует семантическую согласованность данных на всех уровнях управления. Формализованная структура позволяет эффективно реализовывать алгоритмы оптимизации производственного расписания, обеспечивая точность и надежность планирования.

Имея практические результаты исследования, был разработан алгоритм создания реляционной модели данных в нотации IDEF1X для формализации параметров производственного комплекса в процессе проектирования информационно-управляющей системы (рис. 6) [21].

Таблица 1

Фрагмент тезауруса параметров исполнительных элементов технологической линии

№ параметра	Наименование параметра	Обозначение параметра	Единица измерения параметра
1	Тельфер (индекс тельфера)	D (d)	единицы
2	Зона работы тельфера	Z	единицы
3	Индекс состояния тельфера	qd	единицы
4	Продолжительность состояния тельфера	t_{qd}	секунды
5	Минимальная позиция тельфера	POS_{mind}	единицы
6	Максимальная позиция тельфера	POS_{maxd}	единицы
7	Текущая позиция тельфера	POS_d	единицы
8	Время спуска тельфера	t_{cd}	секунды
9	Время допущения спуска тельфера	t_{dcd}	секунды
10	Время подъема тельфера	t_{nd}	секунды
11	Время допущения подъема тельфера	t_{dnd}	секунды
12	Время шага перемещения тельфера	t_{ind}	секунды

Источник: составлено авторами в дополнение к даталогической модели данных.

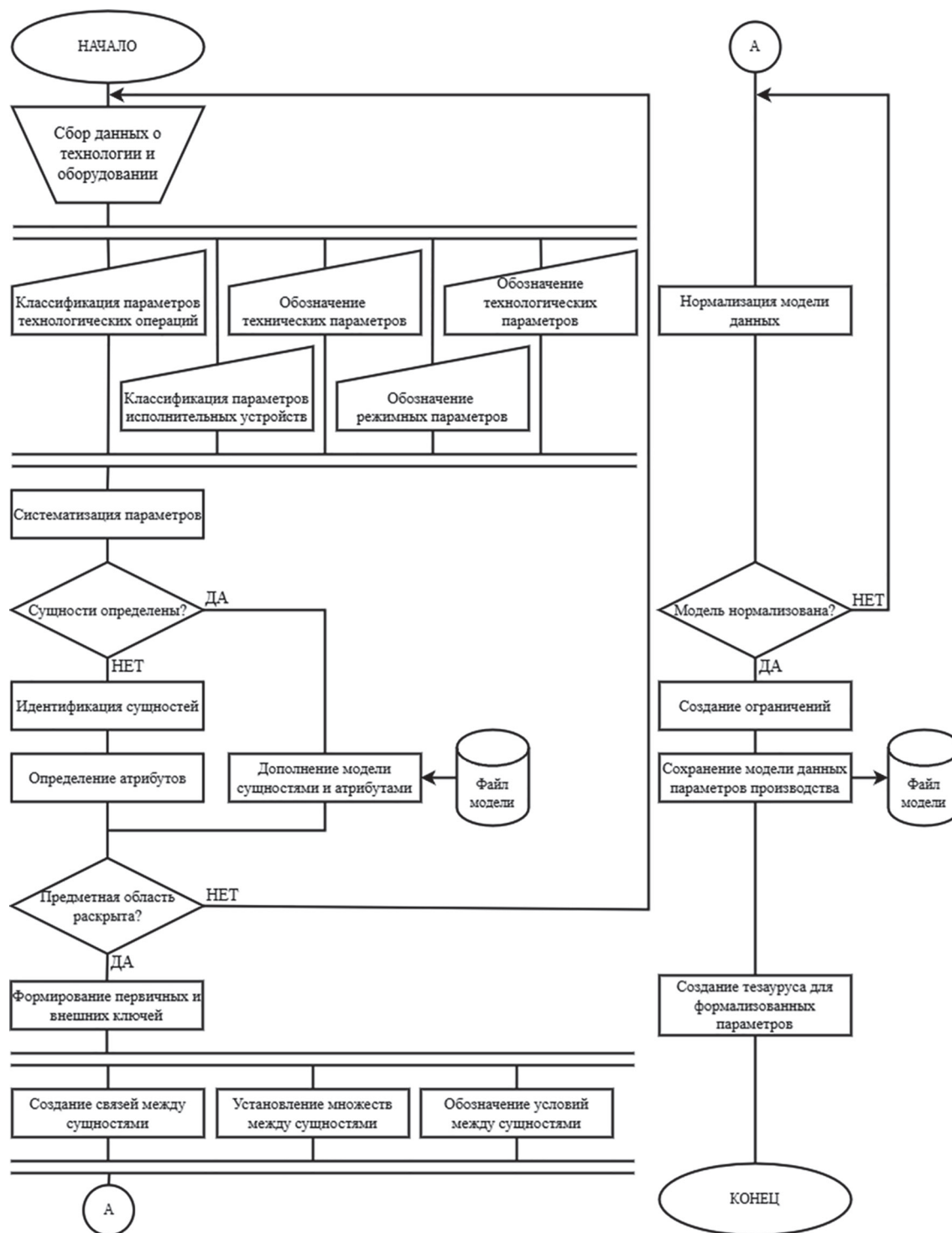


Рис. 6. Алгоритм создания модели данных производственных процессов этапа формализации параметров инфологического анализа в нотации IDEF1X
Источник: составлено авторами

Завершающей задачей текущей работы является проведение сравнительного анализа применения подходов формализации параметров через функциональную схему автоматизации и реляционную модель дан-

ных, а также оценка применимости предложенного в исследовании метода.

Была проведена сравнительная оценка качественных и количественных характеристик использования функциональных

схем автоматизации и метода инфологического анализа на этапе формализации параметров для дискретного поточного многономенклатурного производства (табл. 2). Для сравнения были определены следующие критерии:

1. Гибкость при изменении параметров – возможность вносить изменения в модель данных или схему при изменении производственных условий, таких как новые процессы, типы продукции.

2. Максимально возможные значения количества отображаемых параметров без потери качества восприятия – максимальное количество технологических и управленческих параметров можно представить и анализировать в одной модели без потери наглядности и удобства восприятия.

3. Возможность учета вариативности технологических процессов – способность метода описывать разные варианты и изменения технологических процессов без необходимости значительной переработки схем.

4. Уровень структуризации данных – значения, определяющие интуитивно понятные сущности, атрибуты, связи, элементы, параметры в моделях.

5. Возможность учесть параметры переналадки оборудования – удобство формализации и анализа параметров, связанных с переналадкой оборудования между различными технологическими режимами.

6. Возможность интеграции с автоматизированными системами управления производством – степень доступности интеграции модели с существующими автоматизированными системами управления производством.

7. Возможность автоматической проверки и нахождения ошибок в моделях и целостности данных – характеристика о наличии встроенных механизмов проверки данных на ошибки, логические противоречия и целостность информации.

Использование инфологического анализа позволяет существенно повысить эффективность формализации параметров для проектирования информационно-управляющей системы планирования и управления технологическими линиями в условиях дискретного поточного многономенклатурного производства обработки изделий гальваническими покрытиями. Гибкость инфологического анализа позволяет оперативно адаптировать модель, в то время как функциональная схема автоматизации требует значительных изменений и затрат времени.

Таблица 2

Сравнительная таблица подходов функциональной схемы автоматизации и инфологического анализа

№ критерия	Наименование критерия	Функциональная схема автоматизации	Инфологический анализ создания реляционной модели данных
1	Гибкость при изменении параметров	Низкий уровень гибкости	Высокий уровень гибкости
2	Максимально возможное значение количества отображаемых параметров без потери качества	100–150 параметров	Более 500 параметров одновременно
3	Возможность учета вариативности технологических процессов	Низкая (ограниченная) вариативность	Высокая вариативность
4	Уровень структуризации данных	Средний уровень (атрибуты, связи)	Высокий уровень (сущности, атрибуты, связи, правила, ограничения)
5	Способность учета параметров переналадки оборудования	Сложность в реализации учета параметров переналадки и состояний оборудования	Легка в реализации учета и отображения параметров исполнительных элементов технологической линии
6	Возможность интеграции с автоматизированными системами управления производством	Средний предел возможностей (необходимы дополнительные ресурсы)	Высокий предел возможностей (ERP, MES, автоматизированные системы управления)
7	Наличие механизмов для автоматической проверки моделей на ошибки и целостность данных	Отсутствие	Имеются встроенные механизмы

Источник: составлено авторами по результатам проведенного исследования.

Функциональная схема автоматизации имеет ограничения по количеству параметров, в отличие от инфологического анализа, способного отображать и структурировать значительно большее число параметров. Инфологический анализ относится к гибким подходам, поэтому позволяет учитывать вариативность значительно легче, чем функциональная схема автоматизации. В производственном комплексе обработки материалов гальваническими покрытиями применение функциональной схемы автоматизации на технологические линии потребовало бы создания отдельной схемы для каждой комбинации номенклатуры, а это $8 \text{ процессов} \times 3 \text{ линии} = 24$ уникальные схемы. Инфологическая модель сокращает это до одной модели данных. Инфологический анализ характеризуется высоким уровнем структуризации данных, обеспечивающим производительную обработку, хранение и анализ за счет ранее выявляемых связей и атрибутов в сущностях. Инфологический анализ предоставляет эффективный инструмент для структурированного описания технических, технологических и режимных параметров в дискретном поточном многономенклатурном производстве, в то время как функциональная схема автоматизации сталкивается с трудностями в их отображении. Подход инфологического анализа формализации параметров при проектировании информационно-управляющей системы производства относится к легко интегрируемым за счет стандартизированной реляционной модели данных в нотации IDEF1X. Нотация IDEF1X в инфологическом подходе анализа включает встроенные механизмы для проверки целостности и корректности данных в то время, как в средствах создания функциональной схемы автоматизации и самой модели они отсутствуют.

Заключение

Предложенный метод формализации параметров с подходом инфологического анализа и средствами реляционной модели данных для проектирования информационно-управляющей системы производственных комплексов представляет собой альтернативу традиционным подходам в дискретном поточном многономенклатурном производстве. Метод инфологического анализа демонстрирует значительные преимущества перед функциональной схемой автоматизации по таким ключевым критериям, как гибкость, масштабируемость, удобство восприятия, быстрота адаптации к изменениям и интеграция с другими системами управления. Все эти факторы подчеркивают

его эффективность и предпочтительность для применения в условиях дискретного поточного многономенклатурного производства. Таким образом, метод формализации параметров с помощью подхода инфологического анализа с использованием нотации IDEF1X обеспечивает существенные преимущества перед функциональной схемой автоматизации по ключевым показателям и является более эффективным и предпочтительным инструментом систематизации параметров параметрами дискретного поточного многономенклатурного производства. Предложенный подход обеспечивает прозрачность управления данными, поддержку полного жизненного цикла системы и адаптивность к динамическим требованиям гибкого производства.

Результаты исследования подтверждают эффективность реляционной модели данных для формализации технических, технологических и режимных параметров производственных систем. А это предлагает перспективы интеграции и масштабирования с другими сервисами для управления производством.

Список литературы

1. Володина А.М., Богомольная Г.В., Киселев Д.С., Курнасов Е.В. Использование онтологического инжиниринга при анализе технологических линий // Современная электроника. 2022. № 8. С. 16–19.
2. Пиотровский Д.Л., Холопов В.А., Киселев Д.С., Клягин М.М. Ручная сборка изделий с интерактивным сопровождением операций // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77. № 10. С. 447–452. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-447-452. EDN: WLCEKT.
3. Холопов В.А., Гантц И.С., Антонов С.В. Применение информационных технологий при решении задач мониторинга выполнения производственных процессов в концепции Индустрии 4.0 // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 4. С. 49–58. EDN: ZCUNZR.
4. Каширская Е.Н., Холопов В.А., Соклаков Ф.В., Сухастерин А.Б. Информационно-управляющая система для управления технологическим процессом посредством цифрового двойника // Промышленные АСУ и контроллеры. 2020. № 8. С. 46–50. DOI: 10.25791/asu.8.2020.1211. EDN: RNQPPK.
5. Sokolov B., Ivanov D., Dolgui A. Introduction to scheduling in industry 4.0 and cloud manufacturing systems / Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing // International Series in Operations Research & Management Science. Vol. 289. New York, USA, 2020. P. 1–9. DOI: 10.1007/978-3-030-43177-8_1.
6. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S.P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications // International Journal of Production Research. Abingdon, England. 2018. Vol. 57, Is. 2. P. 411–432. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442948.
7. Arsyad Junaiddin, Deddy Takdir Syaifuddin, Yusuf Montundu, Sudirman Zaid. The Application of Linear Programming into Production Schedule at Electrical Panel Company // International Journal of Membrane Science and Technology, Karachi, Pakistan. 2023. Vol. 10, Is. 3. P. 354–371. DOI: 10.15379/ijmst.v10i3.1540.

8. Lingxin Wang, Rosa Abbou, Catherine da Cunha. Multi-stage scheduling for sustainable manufacturing: balancing demand, resources, and social responsibility // *International Journal of Dynamics and Control*. Cham, Switzerland. 2025. № 13. P. 187. DOI: 10.1007/s40435-025-01694-7.
9. Fera M., Fruggiero F., Lambiase A., Martino G., Nenni M.E. Production Scheduling Approaches for Operations Management // *InTech*. USA. 2013. DOI: 10.5772/55411.
10. Del Gallo M., Mazzuto G., Ciarapica F.E., Bevilacqua M. Artificial Intelligence to Solve Production Scheduling Problems in Real Industrial Settings: Systematic Literature Review // *Electronics*. Basel, Switzerland, 2023. Vol. 12, Is. 23. P. 4732. DOI: 10.3390/electronics12234732.
11. Yuanyuan Li, Stefano Carabelli, Edoardo Fadda, Daniele Manerba, Roberto Tadei, Olivier Terzo. Machine learning and optimization for production rescheduling in Industry 4.0 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London, UK. 2020. № 110. P. 2445–2463. DOI: 10.1007/s00170-020-05850-5.
12. Chen J., Wang G., Lu J., Zheng X., Kiritsis D. Model-based system engineering supporting production scheduling based on satisfiability modulo theory // *Journal of Industrial Information Integration*. Amsterdam, Netherlands. 2022. № 27. P. 18. DOI: 10.1016/j.jii.2022.100329.
13. Witsch M., Vogel-Heuser B. Towards a Formal Specification Framework for Manufacturing Execution Systems // *IEEE Transactions on industrial informatic*. Vol. 8. Piscataway, NJ, USA. 2012. № 2. P. 311–320. DOI: 10.1109/TII.2012.2186585.
14. Kocher A., Vieira da Silva L.M., Fay A. Modeling and Executing Production Processes with Capabilities and Skills using Ontologies and BPMN // *IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Stuttgart, Germany. 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921564.
15. Andre E., Liu S., Liu Y., Choppy C., Sun J., Dong J.S. Formalizing UML State Machines for Automated Verification // *ACM Computing Surveys*, New York, USA. 2023. Vol. 55, Is. 13. P. 1–47. DOI: 10.1145/3579821.
16. Гуров В.А. Усовершенствование автоматизированной системы нагрева продукта с применением подогревателя поверхностного типа // *Шаг в науку*. 2024. № 1. С. 41–47. EDN: FYOZCU.
17. Оковитая К.О., Макаренко В.Г., Суржко О.А. Автоматизация работы двухреакторной установки для получения биогаза из отходов агропромышленного комплекса // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2024. Т. 16. № 4. С. 131–135. DOI: 10.36508/RSATU.2024.33.14.019. EDN: NAEBJG.
18. ГОСТ 21.408-2013. Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов. Введ. 2014-11-01. М.: Стандартинформ, 2014.
19. ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. Введ. 2014-11-01. М.: Стандартинформ, 2015.
20. Клягин М.М., Зайцев И.Ю. Особенности проектирования баз данных производственных процессов // *Концепция устройства современного мира в эпоху цифры: сборник научных трудов по материалам Международного научного форума (Москва, 15 декабря 2023 г.)*. М.: Алеф, 2023. С. 93–102. DOI: 10.26118/1300.2023.63.84.006.
21. ГОСТ 19.701-90 (ИСО 5807-85). Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. Введ. 1992-01-01. М.: Стандартинформ, 2010.