

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Сулейкина Александра Сергеевича на тему: «Методы анализа и синтез архитектуры цифровых производственных экосистем», представленной на соискание ученой Степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)».

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертационного исследования А.С. Сулейкина определяется необходимостью создания интегрированных систем нового поколения для управления производственным процессом промышленного предприятия. Такие системы должны эффективно функционировать в условиях:

- гетерогенных, асинхронно поступающих больших данных,
- усложнения цепочек поставок и взаимодействия с поставщиками и потребителями,
- гибкости производства, его клиентоориентированности, акцента на мелкосерийное производство.

Вместе с тем в последнее время существенно обновилась техническая и технологическая оснащенность производства, успешно используются современные информационные технологии, такие как промышленный интернет вещей, облачные технологии, цифровые двойники. На всех уровнях управления производством (собственно технологические процессы, оперативное управление, производственная логистика, планирование и управление ресурсами) применяются современные методы и технологии управления, в частности, корпоративные, отраслевые и меж-секторальные цифровые платформы (ЦП). Появились практические примеры использования ЦП в качестве основы для разработки цифровых экосистем (ЦЭС). ЦЭС как цифровое пространство, бесшовно соединяющее разнообразные сервисы компании, ее партнеров, поставщиков и потребителей, хорошо зарекомендовали себя в сегменте B2C (бизнес для потребителя), обеспечивая

крупным компаниям качественно новый уровень клиентоориентированности за счет комплексного использования информации, сквозной автоматизации и оптимизации, оперативности изменений и предвосхищении ожиданий пользователей. Важный тренд последнего времени – реализация ЦЭС в сегменте В2В (бизнес для бизнеса), чему посвящена диссертационная работа А.С. Сулейкина.

Таким образом, исследуемая диссертантом тематика интегрированных систем управления производством как цифровых экосистем безусловно актуальна и соответствует выбранной специальности. Столь же перспективным представляется применение принципа управления в режиме реального времени на основе прогнозирующих моделей на всех этапах и уровнях производственного процесса.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

На защиту вынесены следующие научные положения:

- формальное представление интегрированных систем управления производством как цифровых мультиконсортных экосистем;
- концепция управления цифровыми мультиконсортными производственными экосистемами на основе цифровых предиктивных моделей, использующих индуктивные знания;
- интерпретация управления ЦЭС как ситуационного управления сложной системой;
- методы определения условий стабильного функционирования комплекса систем производственного управления;
- концептуальная и функциональная архитектура интегрированной системы управления производством, основанная на цифровых предиктивных моделях;
- прототип системы управления ЦЭС производства в ПАО «КАМАЗ» для задачи прогнозирования состояния серверного комплекса ресурсов.

Данные положения обоснованы соответствием разработанных диссертантом моделей и методов свойствам объекта исследования.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается применением классических методов теории идентификации и управления, методов математического моделирования и машинного обучения, методов разработки и применения баз индуктивных знаний, основанных на интеллектуальном анализе данных. Валидация разработанных моделей на реальных и тестовых данных также свидетельствует о достоверности результатов исследования.

Научная новизна диссертационной работы подтверждается следующими результатами:

- предложена архитектура системы управления ЦЭС промышленного предприятия на основе цифровых предиктивных моделей;
- разработаны ассоциативные методы идентификации ЦЭС как мультиконсортных систем;
- разработаны ассоциативные методы прогнозирования производственных ситуаций;
- предложен метод разработки цифровых двойников производственных процессов как идентификаторов в цепи обратной связи, построенных с помощью цифровых идентификационных моделей;
- определены условия устойчивости мультиконсортных производственных систем.

Теоретическая значимость

Предложены методы анализа и синтеза интегрированных систем управления производством промышленного предприятия как мультиконсортных ЦЭС. Показано, что стабильность функционирования таких систем обусловлена не только устойчивостью систем управления на различных уровнях производственного управления, но и стабильностью функционирования инфраструктуры и обеспечивающих микросервисов ЦЭС. Определены условия устойчивости системы управления ЦЭС.

Практическая ценность работы

Разработан прототип системы управления производственными ресурсами в ЦЭС промышленного предприятия. Система управления предоставляет возможность:

- создавать и корректировать в режиме реального времени прогнозирующие модели состояния ресурсов производства;
- в режиме реального времени выявлять прогнозируемые критичные отклонения исследуемых показателей системы для поддержки принятия проактивных управленческих решений;
- обеспечивать устойчивое функционирование экосистемы и самостоятельно возобновлять ее работу в случае отказов оборудования;
- взаимодействовать с другими внешними экосистемами, обмениваясь данными через определенные консорт-сервисы в рамках системы управления.

Общая характеристика диссертационной работы и ее соответствие критериям научно-квалификационной работы

Диссертационная работа Сулейкина А.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация содержит 128 страниц основного текста, 23 иллюстрации, 1 таблицу, список литературы, включающий 170 наименований.

Во **Введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, описаны структура работы, основные методы исследования, приведено краткое содержание разделов.

Первая глава содержит аналитический обзор научных исследований по различным аспектам разработки ЦЭС. Освещены основные аспекты развития ЦЭС в области логистики, в электроэнергетике и промышленности. Показано, что успешное функционирование таких сложных социотехнических систем возможно только посредством их реализации в цифровой информационной среде с использованием современных информационных технологий, в частности, технологий больших данных.

Введено понятие «консорт», позволяющее в рамках единого формализма исследовать свойства, состояние и взаимосвязи различных участников ЦЭС. Показано, что в системе управления ЦЭС могут быть выделены консорты трех основных типов: консорты-решатели целевых задач (или консорты систем управления); обслуживающие консорты обработки данных; инфраструктурные консорты. Для обеспечения стабильной работы этой сложной системы должны учитываться состояние и работоспособность каждого отдельного консорта. Показано, что мультиконсортный подход к синтезу производственной ЦЭС с использованием цифровых алгоритмов идентификации и прогнозирования позволит обеспечить ее устойчивое функционирование и создаст базу для оптимизации решения целевых задач.

Во второй главе диссертационной работы формулируются условия устойчивости интегрированных систем управления производством как мультиконсортных систем с использованием ассоциативных алгоритмов идентификации и кратномасштабных вейвлет-разложений; предложены алгоритмы прогнозирования производственных ситуаций.

Показано, что для консорт из первой группы (консорты систем управления) эффективность функционирования в значительной степени определяется точностью идентификационной модели, которая достигается за счет использования ассоциативных моделей реального времени, основанных на индуктивных знаниях.

Определены условия устойчивости сложных нестационарных систем в терминах кратномасштабных вейвлет-разложений отдельных подсистем. Для каждого временного такта вводится понятие динамического слепка, представляющего собой кратномасштабное вейвлет-разложение входов и выходов системы для фиксированного значения глубины разложения.

Рассмотрен подход к формированию ассоциативной модели производственной ситуации. Вектор состояния сложной системы, определяемый состояниями консорт различных типов (консорт подсистем решения целевых задач; консорт инфраструктуры и обслуживающих

консортов), может быть интерпретирован как вектор, характеризующий текущую производственную ситуацию.

Часть признаков, характеризующих ситуацию, можно описывать нечеткими переменными. Также применяется кодирование категориальных признаков различными способами, такими как, например, нумерация в пределах допустимого набора значений с последующим проецированием на вещественную ось.

Третья глава содержит описание разработанных диссертантом модели концептуальной архитектуры системы управления ресурсами производства в ЦЭС предприятия и модели функциональной архитектуры консорт-сервисного слоя с указанием основных свойств и функций всех слоев.

Обосновано, что для построения интегрированной системы управления ЦЭС предприятия необходимо осуществлять интеграцию гетерогенных, асинхронно поступающих данных с разных уровней промышленного предприятия. Применение технологий слияния данных (data fusion) разных уровней позволяет выявить зависимости между процессами и объектами разных уровней, что повышает точность моделей.

Формулируется критерий устойчивости системы управления ЦЭС как сложной мультиконсортной системы в виде ограничений на коэффициенты кратномасштабных вейвлет-разложений входов и выходов. При этом для каждого консорта типа «система управления» должна гарантироваться стабильность функционирования сервис-консортов и консортов инфраструктуры.

В **четвертой главе** представлен прототип системы управления ресурсами производства в ЦЭС ПАО «КАМАЗ» с использованием предиктивных моделей состояния загрузки серверного комплекса ресурсов. Описаны характеристики основных программных средств, использованных при внедрении данного приложения.

Замечания по диссертационной работе и автореферату

1. Аналитический обзор литературы несколько перегружен описанием систем и методов, имеющих косвенное отношение к теме диссертации: например, описание ЦЭС в электроэнергетике и управлении цепочками поставок, обзор литературы по разработке цифровых двойников и анализ проблем их внедрения, обзор методов хранения данных в оперативной памяти.

2. В диссертации определены условия устойчивого функционирования интегрированной системы управления производственным процессом как мультиконсортной ЦЭС. Соблюдение этих условий рассматривается как необходимая предпосылка оптимизации управления производством на основе предложенных методов ассоциативной идентификации и прогнозирования, но о самой оптимизации в диссертационной работе ничего не говорится.

3. Не вполне четко обосновано, каким образом гарантируется масштабируемость предложенной архитектуры при расширении набора консортов-сервисов, что необходимо для обеспечения гибкости и клиентоориентированности современного производства.

4. В автореферате диссертации (с. 11) недостаточно подробно описана цифровая идентификационная модель производственной ситуации, рассматриваемая автором как цифровой двойник ситуации.

5. Встречаются неточные и неудачные обозначения, например:

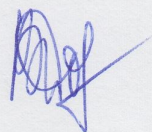
- в автореферате в формуле (4) вместо индекса k коэффициентов b_{jk} должен быть индекс p ;
- размерность вектора входов в формуле (4) должна быть обозначена через P ;
- дискретный момент времени на с.10 автореферата лучше обозначить через k .

Отмеченные замечания имеют рекомендательный и редакционный характер и не снижают положительное впечатление о работе.

Заключение. Представленная работа представляет собой завершенное научное исследование, удовлетворяющее требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, изложенных в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), результаты достоверны, приведенные выводы обоснованы, имеют научную новизну и практическую значимость, а ее автор Сулейкин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Официальный оппонент

Дозорцев Виктор Михайлович,
доктор технических наук,
директор по развитию бизнеса
ООО «Центр цифровых технологий»,
Адрес: 121205, г. Москва,
Территория Сколково Инновационного центра,
улица Нобеля, дом 7, помещение 29.
Телефон: +7 495 727-31-50,
Адрес электронной почты:
victor.dozortsev@mipt-cdt.ru



Подпись Дозорцева В.М. заверяю,
Генеральный директор
ООО «Центр цифровых технологий»



Д.В. Агафонов

«12» января 2023 г.