

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

На правах рукописи

Сулейкин Александр Сергеевич



**Методы анализа и синтез архитектуры
цифровых производственных экосистем**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте проблем управления
имени В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)

Научный руководитель: **Наталья Николаевна Бахтадзе**,
доктор технических наук, профессор,
Государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова
РАН (ИПУ РАН), г. Москва

Официальные оппоненты: **Виктор Михайлович Дозорцев**,
доктор технических наук, директор по
развитию бизнеса ООО "Центр
цифровых технологий", г. Москва

Рифкат Талгатович Сиразетдинов,
доктор технических наук, доцент,
Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева
(КНИТУ КАИ), профессор кафедры
Динамики процессов и управления, г.
Казань, Татарстан

Ведущая организация: МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Защита состоится «16» февраля 2023 г. в 16.00 на заседании
диссертационного совета 24.1.107.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А.
Трапезникова РАН по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65, ИПУ
РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПУ
РАН <https://www.ipu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.107.01
кандидат технических наук

 Е.Ф. Жарко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Выраженной тенденцией в мировой экономике становится нарастающее использование отраслевых и межсекторальных цифровых платформ в качестве основы для разработки цифровых экосистем (ЦЭС). ЦЭС способствуют созданию новых бизнес-моделей и инновационных решений, что, как показывают многочисленные примеры, существенно повышает конкурентоспособность предприятий и компаний.

Под цифровой экосистемой (ЦЭС) понимается распределенная социотехническая система, обладающая свойствами адаптивности, самоорганизации и устойчивости, функционирующая в условиях конкуренции и сотрудничества между различными субъектами данной системы (автоматизированными системами и экономическими субъектами) в которой осуществляется обмен знаниями для эволюционного развития системы. Как правило, она представляет собой сеть компаний и организаций в регионе, которые используют попутно образующиеся продукты, отходы и энергию по одному из следующих направлений: уменьшение объемов потребляемого первичного сырья; снижение степени загрязнения окружающей среды; повышение эффективности использования энергии, а, следовательно, уменьшение объемов потребления первичных энергетических ресурсов; уменьшение количества отходов и затрат на их захоронение. По аналогии с природными экосистемами, элементы ЦЭС, решающие определенные целевые задачи/набор задач, либо выполняющие сервисные функции, будем называть цифровыми консортами.

В последние годы наиболее востребованным подходом к управлению сложными техническими объектами (нелинейными, со значительным транспортным запаздыванием, с взаимосвязанными регулируемыми переменными, с множеством одновременно соблюдаемых ограничений) стала технология управления на основе прогнозирующей модели объекта. Идея такого управления – использование заранее построенной математической модели объекта в контуре автоматического управления. В мировую практику вошел термин Model-based predictive control (или сокращенно Model predictive control (MPC) – «Прогнозирующее управление на основе модели». Представляется перспективным использовать управление на основе прогнозирующих моделей как основной принцип управления не только технологическими объектами

(технологическими процессами, технологическими переделами, производственными участками и т.п.) но и процессами управления в ЦЭС предприятия. В качестве моделей производственных процессов представляется целесообразным применять идентификационные модели.

Наиболее известны в области теории и методов идентификации классические работы П. Эйкхофа, Д. Гроппа, Э.П. Сэйджа и Дж.Л. Мелсы, Я.З. Цыпкина, Н.С. Райбмана, Л. Льюнга, А.В. Назина, А.Г. Александрова, А.Л. Бунича и других. Для разработки производственных ЦЭС представляется целесообразным использовать цифровые идентификационные модели, основанные на индуктивных знаниях (термин В.Н. Вапника) о производственных процессах.

Для разработки и адаптивной настройки систем управления эффективно зарекомендовали себя цифровые двойники. В качестве таковых могут рассматриваться не только кибер-физические системы с использованием интернета вещей и имитационных моделей, но и идентификаторы в цепи обратной связи системы управления.

Для создания системы управления ЦЭС промышленного предприятия требуется знание методов, технологий и инструментов больших данных (Big Data), на которых базируются современные цифровые платформы. Применение новейших технологий хранения и обработки больших данных, их интеграции, виртуализации, контейнеризации, наряду с использованием методов управления цифровыми экосистемами на основе цифровых предиктивных моделей, предоставляет возможность разработать интегрированную систему управления производством нового поколения.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена технологической, экономической и экологической целесообразностью построения системы управления ЦЭС промышленного предприятия как интегрированной системы управления производственным комплексом с использованием предиктивных моделей реального времени производственных процессов на основе обработки больших разнородных производственных данных в реальном времени.

Цель диссертационной работы состоит в разработке методов анализа и синтеза архитектуры цифровых производственных

экосистем на основе цифровых предиктивных идентификационных моделей.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- проанализировать известные результаты в области разработки и развития ЦЭС;
- разработать методы анализа и прогнозирования показателей производственных процессов и ситуаций на основе цифровых алгоритмов идентификации;
- разработать методы идентификации ЦЭС как мультиконсортных динамических систем;
- исследовать и проанализировать: системы класса больших данных для обработки разнородных данных в режиме реального времени в оперативной памяти (Big Data In-Memory Systems), системы обработки сообщений в потоковом режиме, технологии виртуализации и контейнеризации;
- разработать концептуальную архитектуру и функциональную архитектуру сервисного слоя системы управления ЦЭС промышленного предприятия;
- разработать подход к обеспечению стабильного функционирования ЦЭС, учитывающий влияние внешних экосистем, и обеспечивающий: надежность вычислительной инфраструктуры, стабильное функционирование обслуживающих консорт-сервисов, устойчивость систем управления;
- разработать прототип системы прогнозирования состояния загрузки серверного комплекса для управления ресурсами в цифровой производственной экосистеме ПАО «КАМАЗ» - одного из консортов ЦЭС.

Объектом диссертационного исследования является совокупность производственных процессов промышленного предприятия.

Предмет диссертационного исследования – ЦЭС промышленного предприятия как интегрированная система управления производством.

Методы исследования. Методы идентификации систем управления, методы интеллектуального анализа данных, методы машинного обучения, разработки систем больших данных, методы разработки реляционных и нереляционных баз данных, методы визуализации данных.

Связь диссертации с планом научных работ. Исследования выполнялись в соответствии с планом научных работ лаборатории 41 ИПУ РАН.

Соответствие шифру специальности. Работа соответствует шифру специальности 2.3.3 и охватывает следующие области исследований, входящие в специальность:

- п. 6. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления;

- п. 9. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы и банки данных и методы их оптимизации;

- п. 11. Методы планирования и оптимизации отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации задач функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом;

- п. 13. Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации;

- п. 19. Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления.

Научная новизна работы заключается в разработке:

- архитектуры системы управления ЦЭС промышленного предприятия на основе цифровых предиктивных моделей;

- цифровых ассоциативных методов идентификации ЦЭС как мультиконсортных систем.

- метода ассоциативного прогнозирования производственных ситуаций;

- цифровых двойников производственных процессов как идентификаторов в цепи обратной связи на основе цифровых идентификационных моделей;

- условий устойчивости мультиконсортных производственных систем.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке прототипа системы управления

производственными ресурсами в ЦЭС промышленного предприятия. Разработанная реальная система управления позволяет:

- в режиме реального времени строить прогнозирующие модели изменения состояния ресурсов производства;
- в режиме реального времени выявлять прогнозируемые критичные отклонения исследуемых показателей системы для поддержки принятия превентивных управленческих решений;
- устойчиво функционировать и самостоятельно возобновлять работу в случае отказов оборудования;
- взаимодействовать с другими внешними экосистемами, обмениваясь данными через определенные консорт-сервисы в рамках системы управления.

На защиту выносятся следующие положения:

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

Внедрение результатов исследований. Результаты теоретического исследования ЦЭС, методов хранения и обработки больших данных, методов слияния данных, алгоритмов создания прогнозирующих моделей производственных ситуаций на основе пополняемой базы знаний, моделей архитектуры, а также реализованные консорт-сервисы прогнозирования состояния загрузки серверного комплекса ресурсов используются в ПАО «КАМАЗ», что подтверждено Актом о внедрении.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях – МІМ – Нант,

Франция, 2022 (2 доклада); Берлин, Германия, 2019; CoDIT – Стамбул, Турция, 2022; IMS – 2022; DAAAM International – Задар, Хорватия, 2017, 2019, 2020, 2021; FRUCT – Москва, Россия, 2019; MACSPro – Вена, Австрия, 2019; IEEE BigData – Лос-Анджелес, США, 2019, 2020; IntelliSys – Амстердам, Голландия, 2020; MEDES – 2020, 2021; FICC – Ванкувер, Канада, 2021; INCOM – 2021.

Обоснованность и достоверность научных положений обеспечивается корректным применением фундаментальных положений теории идентификации систем управления, методов и технологий больших данных в качестве основы для создания интегрированной системы управления производством в ЦЭС промышленного предприятия. Высокая точность прогнозирования и надежность прототипа системы управления серверным комплексом ресурсов на ПАО» КАМАЗ» подтверждают достоверность положений, выносимых на защиту.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 24 печатные работы, все работы индексируются в Web of Science и/или SCOPUS и содержатся в перечне ВАК.

Личный вклад соискателя. Все исследования, представленные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию добавлены результаты исследований, которые непосредственно принадлежат автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация содержит 130 страниц основного текста, 23 иллюстрации, 1 таблицу; список литературы включает 170 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой** главе диссертационной работы приведен аналитический обзор научных исследований в сфере разработки ЦЭС, освещено развитие ЦЭС в области цепочек поставок, энергетике и производстве. Показано, что ЦЭС способны играть важную роль в деятельности современных промышленных предприятий, а успешное функционирование таких сложных социотехнических систем прочно

ассоциировано с их реализацией в цифровой информационной среде посредством современных информационных технологий, в особенности, технологий Big Data.

Участники ЦЭС, называемые «консортиями», в процессе адаптации к условиям существования и функционирования получают дополнительное преимущество, создавая многочисленные взаимосвязи. Показано, что могут быть выделены консорты трех основных типов в системе управления ЦЭС: консорты-решатели целевых задач, интерпретируемые как задачи управления; обслуживающие консорты обработки данных; инфраструктурные консорты. Для обеспечения стабильной работы этой сложной системы должны учитываться состояние и работоспособность каждого отдельного консорта.

Мультиконсортный подход к синтезу производственной ЦЭС с использованием цифровых алгоритмов идентификации и прогнозирования позволит обеспечить их стабильное функционирование и оптимизацию решаемых целевых задач.

Во **второй** главе диссертационной работы формулируются условия устойчивости интегрированных систем управления производством как мультиконсортных систем с использованием алгоритмов идентификации на основе ассоциативного поиска и кратномасштабных вейвлет-разложений, а также предложены алгоритмы прогнозирования производственных ситуаций.

Описан подход к управлению ЦЭС, обеспечивающий ее стабильное функционирование. ЦЭС формализуется как система взаимодействующих цифровых консортов:

$$DES = \{\langle C_1 \rangle \langle C_2 \rangle \dots \langle C_N \rangle\}, \quad (1)$$

где $C_i, i = 1, \dots, N$ – все элементы (консорты) исследуемой ЦЭС. Все консорты можно разделить на три основные группы: подсистемы, решающие определенные целевые задачи (это могут быть автоматические или автоматизированные системы, либо интеллектуальные агенты), а также инфраструктурные консорты и вспомогательные консорты обработки данных:

$$DES = \{\langle C_1^c, \dots, C_{N_1}^c \rangle \langle C_1^{ic}, \dots, C_{N_2}^{ic} \rangle \langle C_1^{pc}, \dots, C_{N_3}^{pc} \rangle\}, \quad (2)$$

где:

- DES – формальное обозначение ЦЭС (Digital Ecosystem);
- $C_i^c, i = 1, \dots, N_1$ – подсистемы ЦЭС, решающие определенные целевые задачи, успешность решений которых интерпретируется как эффективность управления этой подсистемой;

- $C_i^{ic}, i = 1, \dots, N_2$ – консорты вычислительной инфраструктуры, на основе которых функционируют все остальные консорты;

- $C_i^{pc}, i = 1, \dots, N_3$ – консорты обработки данных, функционирующие на базе вычислительной инфраструктуры и обеспечивающие подготовку данных для основных консортов.

Работоспособность функционирования ЦЭС достигается совокупным обеспечением:

1) устойчивости сложной динамической системы

$$DES^C = \langle C_1^c, \dots, C_{N_1}^c \rangle, \quad (3)$$

и, следовательно, – устойчивости консортов-решателей целевых задач как динамических систем;

2) инфраструктурной стабильности и стабильности программного обеспечения обработки данных («обеспечивающих» консортов).

Показано, что для подсистем управления эффективность функционирования в значительной степени определяется точностью идентификационной модели. Отмечено, что для идентификационного моделирования нелинейных объектов, к которым относится значительное количество производственных процессов, высокую эффективность продемонстрировали методы идентификации, получившие название методов ассоциативного поиска. При использовании последних идентификационная модель выглядит следующим образом:

$$y_t = a_0 + \sum_{i=1}^r a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^s \sum_{p=1}^p b_{jk} x_{t-j,p} \quad (4)$$

где: y_t – прогноз модели на момент времени t , x_t – вектор входа, r – глубина памяти по выходам, s – глубина памяти по входам, p – длина выходного вектора.

В отличие от обычной регрессионной модели, в этой линейной модели нелинейного процесса присутствуют только входы, выбранные из базы знаний в соответствии с определенным критерием «схожести» с текущим входом – «ассоциативности».

Исследуются условия устойчивости сложных нестационарных систем в терминах кратномасштабных вейвлет-разложений отдельных подсистем. Для каждого временного такта вводится понятие динамического слежка, представляющего собой кратномасштабное вейвлет-разложение входов и выходов системы для некоторого значения глубины по времени. Поскольку вейвлет-

преобразование не только позволяет отображать свойства сигналов в частотной области, но и отражает изменения частотных характеристик во времени, его применение позволяет исследовать объекты с изменяющимися характеристиками. Для каждого дискретного момента времени t и предшествующих ему k моментов рассматриваются наборы коэффициентов кратномасштабных вейвлет-разложений входного и выходного сигналов. Совокупность этих коэффициентов формируют *динамический след системы* в момент t – цифровую модель, хранимую в базе знаний. Устойчивость каждой подсистемы определяется свойствами ее динамических следов.

Соискателем предложен подход к формированию ассоциативной модели *производственной ситуации*. Вектор состояния сложной системы, определяемый состояниями консортов различных типов, а именно: консортов – подсистем решения целевых задач; консортов инфраструктуры и обслуживающих консортов, может быть интерпретирован как вектор, характеризующий текущую производственную ситуацию. Формируется *цифровая идентификационная модель ситуации* в момент времени t , для которой ситуация полностью определяется набором значений признаков:

$$S(k) = \langle x(k); u(k-l); y(k-l), a_i^{k-l+1}, b_j^{k-l} \rangle, \quad (5) \\ 1 \leq l \leq k-1, l \in L$$

среди которых присутствуют как значения переменных, характеризующих динамику каждой из подсистем управления, так и тех, что определяют стабильность работы обслуживающих консортов.

Часть признаков, описывающих ситуацию, носят категориальный характер. В некоторых случаях признаки можно описывать нечеткими переменными. Но возможно и кодирование категориальных признаков различными способами, такими как нумерация в пределах допустимого набора значений с последующим проецированием на вещественную ось. Здесь L – множество моментов времени, для которых совокупность значений всех входных признаков были близки к текущему и были выбраны для модели. Совокупность значений этих признаков на момент времени k названа *цифровой моделью ситуации*.

В **третьей** главе диссертационной работы представлены разработанные соискателем модели концептуальной архитектуры системы управления ресурсами производства в ЦЭС предприятия и функциональной архитектуры консорт-сервисного слоя, описаны основные свойства и функции каждого слоя.

Отмечено, что построение интегрированной системы управления ЦЭС предприятия является сложной задачей, которая включает как интеграцию гетерогенных, асинхронно поступающих данных с разных уровней промышленного предприятия, построение современной отказоустойчивой горизонтально-масштабируемой системы хранения и управления этим данными, так и построение интеллектуальных сервисов прогнозирования динамики консортов, что и должно являться ядром интегрированной системы управления нового поколения. Для эффективного и гибкого управления производственным процессом необходимо интегрировать множество данных от разных источников, таких как датчики производственного оборудования, АСУ ТП, системы производственного управления класса MES, планирования производственных ресурсов MRP, а также учетные данные предприятия с уровня ERP, общие корпоративные справочники предприятия, аналитические отчеты BI-систем, внешние открытые источники данных, данные конкурентов и партнеров из внешних цифровых экосистем и др. Применение *технологий слияния данных* (Data Fusion) разных уровней позволит достичь синергетического эффекта и выявлять новые, глубинные зависимости между процессами и объектами разных уровней.

Соискателем формулируется критерий устойчивости системы управления ЦЭС, в котором совокупно учитываются:

- устойчивость всех подсистем решения целевых задач $C_i^c, i = 1, \dots, N_1$, интерпретируемых как системы управления,
- стабильность функционирования инфраструктуры: $C_i^{ic}, i = 1, \dots, N_2$,
- стабильность функционирования консорт-сервисов: $C_i^{pc}, i = 1, \dots, N_3$.

Устойчивость консорций и мультиконсортных систем для широкого класса нелинейных нестационарных консортов исследуется на основе предложенных Н.Н. Бахтадзе критериев устойчивости мультиагентных и мультимодальных систем с

использованием вейвлет-анализа – в виде ограничений на коэффициенты кратномасштабных вейвлет-разложений входов и выходов. Соискателем выявлены аналогичные условия для мультиконсортной системы, где помимо требований для каждого консорта-системы управления должна гарантироваться стабильность функционирования сервис-консогтов и консогтов инфраструктуры.

В **четвертой** главе описан прототип системы управления ресурсами производства в ЦЭС ПАО «КАМАЗ» на основе прогнозирования состояния загрузки серверного комплекса ресурсов. Дается характеристика основных программных средств с открытым исходным кодом, использованных при внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В итоге проведенных исследований получены следующие научные результаты, подтверждающие целесообразность разработки и внедрения интегрированных систем управления производственными промышленными комплексами как ЦЭС, функционирующих на основе цифровых предиктивных идентификационных моделей.

– Разработаны цифровые алгоритмы прогнозирования производственной ситуации на базе методов интеллектуального анализа данных и ассоциативного поиска (соответствует области исследования 6 паспорта специальности).

– Разработаны методы анализа стабильности работы ЦЭС, интерпретируемой как устойчивость мультиконсортной системы (соответствует области исследований 13 паспорта специальности).

– Разработана концептуальная архитектура системы управления ресурсами в ЦЭС промышленного предприятия (соответствует областям исследований 9 и 13 паспорта специальности).

– Разработана функциональная архитектура консорт-сервисного слоя системы управления ресурсами в ЦЭС промышленного предприятия (соответствует областям исследований 9, 13, 19 паспорта специальности).

– Разработан прототип системы управления ресурсами для ЦЭС ПАО «КАМАЗ» в подсистеме прогнозирования состояния загрузки серверного комплекса ресурсов (соответствует областям исследований 9 и 13 паспорта специальности).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Novikov D., Bakhtadze N., Elpashev D., Suleykin A. Integrated Resource Management in the Digital Ecosystem of the Enterprise Based on Intelligent Consorts // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, N. 10. – P. 2330-2335.
2. Pyatetsky V., Bakhtadze N., Elpashev D., Suleykin A. Associative Rules-Driven Intelligent Production Schedule Control System for Digital Manufacturing Ecosystem // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, N. 10. – P. 2526-2532.
3. Panfilov P., Suleykin A. Designing Data-Intensive Application System for Production Plans Data Processing and Near Real-Time Analytics // Proceedings of 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Istanbul. IEEE, 2022. – P. 1495-1500. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9804133>.
4. Bakhtadze N., Cheresenko A., Elpashev D., Suleykin A., Purtov A. Predictive associative models of processes and situations // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, N. 2. – P. 19-24.
5. Panfilov P., Suleykin A., Chumakov I., Bobkova A. Efficient data exchange between typical Data Lake and DWH corporate systems // Proceedings of 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town. IEEE, 2021. – P. 1-6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9698468>.
6. Panfilov P., Suleykin A., Eldarawany A., Elpashev D. Open-Source Digital Infrastructure Capacity Prediction System for Production Company // Proceedings of 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk. IEEE, 2021. – P. 915-920. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9632166>.
7. Panfilov P., Suleykin A., Eldarawany A. Digital Ecosystem-Based KPI-Driven Railway Communication Network Reporting System // Proceedings of the 13th International Conference on Management of Digital EcoSystems (MEDES'21). Association for Computing Machinery. – 2021. – P. 163–166. – URL: <https://doi.org/10.1145/3444757.3485173>.
8. Bakhtadze N., Elpashev D., Suleykin A., Sabitov R., Smirnova G., Kuchinskii M., Sabitov S. System Identification for Manufacturing Control Applications Management Projects for Digital Ecosystems of Automotive Enterprises: Truck Sharing // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2021. – Vol. 630. – P. 563–571.

9. Suleykin A., Bobkova A., Panfilov P., Chumakov I. Comparing HDFS – Greenplum Data Loading Options // Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium Intelligent Manufacturing & Automation. Curran Associates. – 2021. – Vol. 32, N 1. – P. 0724-0731.
10. Bakhtadze, N., Elpashev, D., Suleykin, A., Pyatetsky, V. Digital ecosystem situational control based on a predictive model // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, N 1. – P. 300–306.
11. Suleykin A., Bakhtadze N. Digital Ecosystems Control Based on Predictive Real-Time Situational Models // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1363. – P. 605–623.
12. Panfilov P., Suleykin A. Metadata-Driven Industrial-Grade ETL System // Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Big Data, Los Angeles. IEEE, 2020. – P. 2433-2442. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9378367>.
13. Panfilov P., Suleykin A. Building Resilience into the Metadata-Based ETL Process Using Open Source Big Data Technologies // Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – Vol. 12660. – P. 139-153. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70370-7_8.
14. Bakhtadze, N., Suleykin, A. Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues // Annual Reviews in Control. – 2021. – Vol. 51. – P. 56-64. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.11.001>.
15. Suleykin A., Bakhtadze N., Panfilov P. Big-Data Driven Digital Ecosystem Framework for Online Predictive Control // Proceedings of the 12th International Conference on Management of Digital EcoSystems (MEDES '20). Association for Computing Machinery. – 2020. – P. 92–95. DOI: <https://doi.org/10.1145/3415958.3433077>.
16. Suleykin, A., Panfilov, P. Big Data-Driven Digital Ecosystem Framework for Railway Reporting // Proceedings of the 31st DAAAM International Virtual Symposium Intelligent Manufacturing & Automation. DAAAM International. – 2020. – Vol. 31, N 1. – P. 0499-0509. – DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.070.
17. Suleykin A., Bakhtadze N. Control Systems Architecture with a Predictive Identification Model in Digital Ecosystems // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 200. – P. 439-449. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8131-1_39.
18. Suleykin A., Bakhtadze N. Agent-Based Architectural Models of Supply Chain Management in Digital Ecosystems // Advances in

Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1252. – P. 115-127. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55190-2_9.

19. Suleykin A., Panfilov P., Bakhtadze N. Industrial track: Architecting railway KPIs data processing with Big Data technologies // Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Los Angeles. IEEE, 2019. – P. 2047-2056. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9006196>.

20. Suleykin A., Panfilov P. Implementing Big Data Processing Workflows using Open Source Technologies // Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium. Curran Associates. – 2019. Vol. 30, N 1. – P.0394-0404.

21. Сулейкин А.С., Бахтадзе Н. Н. Модели архитектуры цифровых экосистем в сфере управления цепочками поставок // ИТиВС. – 2019. – № 4. – С. 21–33.

22. Suleykin A., Bakhtadze N., Pavlov B., Pyatetsky V. Digital Energy Ecosystems / IFAC PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52, N 13. – P. 30–35. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.088>.

23. Suleykin A., Panfilov P. Distributed Big Data Driven Framework for Cellular Network Monitoring Data // Proceedings of 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow. IEEE, 2019. – P. 430-436. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8711912>.

24. Suleykin A., Panfilov P. Harnessing the Complexity of Mobile Network Data with Smart Monitoring // Proceedings of the MACSPro Workshop 2019 (MACSPro 2019), Vienna. CEUR-WS.org. – 2019. – Vol. 2478. – P.149-161.

ВКЛАД АВТОРА В ПУБЛИКАЦИИ

В работе [1] был предложен подход к интегрированному управлению ресурсами производства на основе интеллектуальных консортов и алгоритмов ассоциативных правил для прогнозирования состояния производственных ресурсов. В работе [2] была предложена функциональная и компонентная архитектуры системы управления цифровой экосистемой производства и реализовано Case Study на примере реальных производственных данных.

В работе [3] – разработана высоконагруженная система обработки и анализа планов-графиков производства в режиме реального времени. В работах [3, 9] – разработаны интеллектуальные ассоциативные модели производственных ситуаций. В работе [4] - проведено исследование по сравнению наиболее эффективных методов загрузки данных между наиболее популярными системами хранения данных с открытым исходным кодом. В работе [5] - предложена архитектура и комплекс цифровых сервисов управления для прогнозирования серверного комплекса ресурсов промышленного предприятия на основе технологий с открытым исходным кодом. В работах [6, 18] - разработан и внедрен цифровой фреймворк на основе технологий больших данных с открытым исходным кодом для отчетности центральной сети связи ОАО «РЖД», доказана применимость компонентов к обработке большого количества информации, отказоустойчивость, масштабируемость, надежность. В работе [7] - разработана архитектура и интеллектуальные алгоритмы управления проектами в цифровой экосистеме промышленного автомобильного предприятия. В работе [8] - проведено сравнительное исследование различных вариантов загрузки данных между популярными корпоративными системами хранения данных с открытым исходным кодом – HDFS и Greenplum. В работе [10] - разработана система управления цифровой экосистемой на основе предиктивных ситуационных моделей реального времени. В работах [11, 12, 13, 14, 15, 19, 22, 23, 24] - разработаны и протестированы компоненты систем больших данных для управления цифровой экосистемой и общий пайплайн обработки данных, концепция и архитектура систем управления индустриальными цифровыми экосистемами на основе предиктивных моделей, разработаны цифровые фреймворки обработки больших данных, протестирована отказоустойчивость и масштабирование, разработана архитектура управления обработкой

мобильных данных на основе «умного» мониторинга мобильных сетей. В работах [16, 17, 20, 21] - разработана архитектура системы управления цифровой экосистемой на основе предиктивных идентификационных моделей, описан подход к построению и обучению прогнозирующих моделей на основе мультиагентного подхода для цифровых экосистем в области цепочек поставок и энергетике.

Сулейкин Александр Сергеевич
Методы анализа и синтез архитектуры цифровых
производственных экосистем

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 33.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
117997,
ул. Профсоюзная, д. 65
Россия, Москва
<http://www.ipu.ru>