

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-консо́ртов и консортов 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](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](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](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>