

Отчёт о работе в рамках молодёжной научной школы
За первый год проекта

**Методы и алгоритмы идентификации
систем управления производственными
процессами в условиях цифровой
трансформации**

Руководитель МНШ: Бахтадзе Наталья Николаевна, д.т.н.,
профессор, г.н.с. лаборатории № 41

Участники МНШ

	ФИО (полностью)	Научная степень, Звание, должность	Номер лабора- тории	Дата рождения	Примечание
1	Смагличенко Александр Вадимович	К.т.н., старший научный сотрудник	41	24.06.1988	
2	Сулейкин Александр Сергеевич	Научный сотрудник	41	13.01.1994	Аспирант 3-го года, грант РФФИ
3	Захаров Эдуард Александрович	Научный сотрудник	41	20.11.1990	2015 — 2019 - аспирантура ИПУ РАН
4	Кутяков Евгений Юрьевич	Научный сотрудник	82	14.09.1990	Аспирант 2-го года, грант РФФ
5	Галяев Иван Андреевич	Инженер	82	25.09.1999	

Цели проекта

- Создание новых методов идентификации, позволяющих получать высокоточные оценки нелинейных и нестационарных объектов в условиях асинхронно поступающих больших данных. Разработка таких методов позволит осуществлять высокоэффективное управление промышленным и электроэнергетическим производством путем создания цифровых экосистем на основе прогнозирующих моделей реального времени;
- Разработка методов адаптивного мониторинга, диагностики, прогнозной оценки устойчивости и управления в нестационарных и неоднородных динамических системах различной природы.

Задачи проекта

- Разработка цифровых методов идентификации и методов управления с цифровыми прогнозирующими моделями реального времени в условиях гетерогенных больших данных.
- Системный анализ и архитектура цифровых производственных экосистем.
- Разработка методов и алгоритмов управления, мониторинга и оценки состояния нестационарных динамических систем на основе спектральных и структурных разложений энергетических функционалов.
- Их проверка на примере динамических систем, таких как подвеска автомобиля, модель поджелудочной железы и модель электроэнергетической системы.

Основные результаты за отчётный период

- Разработан мультиконсортный подход к синтезу производственной цифровой экосистемы (ЦЭС) с использованием цифровых алгоритмов идентификации и прогнозирования.
- Сформулированы основные принципы построения архитектуры системы управления ресурсами производства в ЦЭС предприятия.
- Разработаны принципы формирования функциональной архитектуры консорт-сервисного слоя и описаны основные свойства и функции каждого слоя архитектуры.
- Сформулирован критерий устойчивости системы управления, в которой учитывается как консорт-сервисная устойчивость консортов как динамических систем, так и инфраструктурная стабильность.
- Внедрен прототип системы управления ресурсами производства с прогнозирующими моделями для цифровой платформы «КАМОТИВ» ПАО «КАМАЗ» на примере задачи прогнозирования серверных производственных мощностей.

Основные результаты за отчётный период

- Построена квадратичная аппроксимация двухрайонной тестовой электроэнергетической системы по типу «схемы Кундура», с подробным описанием элементов матрицы динамики. Разработано программное обеспечение для построения таких аппроксимаций при различных конфигурациях системы.
- Построена четырехмерная модель зрительной коры головного мозга. Доказана полная управляемость системы и существование оптимальных управлений. Численно подтверждена гипотеза об интегрируемости системы по Лиувиллю.
- Предложен метод и алгоритмы настройки системных стабилизаторов, основанный на принципе неявной эталонной модели и адаптивном управлении электромеханическими колебаниями.
- Разработан метод и получены алгоритмы решения обобщенного уравнения Ляпунова для широкого класса непрерывных нестационарных билинейных систем на основе метода грамианов и итеративного метода построения решения.
- Получено спектральное разложение грамианов управляемости и наблюдаемости нестационарной билинейной системы.

Основные результаты за отчётный период

- Для принятия решений о выборе мест бурения скважин с целью производства электроэнергии и теплоснабжения разработан параметр разрешения новой версии метода координатного спуска, так называемого метода вычитания выбранных компонент, для повышения точности которого разработан релаксационный алгоритм, на основе поли-дисциплинарного вычислительного процесса.
- Для решения задач логистики производственно-технологических процессов разработан новый метод, основанный на распознавании пар сходных числовых строк, для определения позиционирования объектов, участвующих в процессе, по данным глобальной навигационно-спутниковой системы. Для проверки эффективности метода создана экспериментальная модель приема спутниковых сигналов для передачи их показаний в среду обработки созданными компьютерными программами.
- Представлен подход к созданию и исследованию функционирования автоматизированной системы распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи.

Публикации. Перечень.

- Smaglichenko T.A., Smaglichenko A.V. Resolution Estimates for Selected Coordinate Descent: Identification of Seismic Structure in the Area of Geothermal Plants / In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) // Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Switzerland: Springer, 2021. – Vol. 630. – P. 580-588. – DOI: 10.1007/978-3-030-85874-2_62 WoS, SCOPUS
- Smaglichenko T., Smaglichenko A., Sayankina M., Chigarev B., Seismic Anomalies in the Geothermal District Revealed by the Relaxation Algorithm of Selected Coordinate Descent // Proceedings of 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD) / Moscow (September 2021). – IEEE, 2021. – Paper id: 9600169. – DOI:10.1109/MLSD52249.2021.9600169 SCOPUS
- Smaglichenko A.V., Smaglichenko T.A. The simple method to recognize similar numerical strings for the GNSS-positioning task // 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control. IFAC-PapersOnLine. – Elsevier, 2022. (принято к публикации WoS, SCOPUS)
- Смагличенко Т., Якоби В., Смагличенко А., Чигарев Б., Саянкина М. Релаксационный алгоритм выбранного координатного спуска для оценки аномальных структур в области геотермальных станций // Труды четырнадцатой Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем" MLSD-2021. / Москва (сентябрь 2021 г.). – М: ИПУ РАН, 2021. – С. 900-906. – DOI: 10.25728/7689.2021.91.94.001 РИНЦ.
- Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues // Annual Reviews in Control. 2021. 51. С. 56-64, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578820300766>. Q1, WoS, SCOPUS
- Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С., Пятецкий В.Е., Елпашев Д.В. Digital Ecosystem Situational Control Based on a Predictive Model / IFAC-PapersOnLine. 54(1). Pp. 300-306. WoS, SCOPUS
- Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. Agent-Based Architectural Models of Supply Chain Management in Digital Ecosystems / Intelligent Systems and Applications - Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC), Proceedings. Cham: Springer, 2021. volume 1252. Pp. 115-127. SCOPUS
- Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. CONTROL SYSTEMS ARCHITECTURE WITH A PREDICTIVE IDENTIFICATION MODEL IN DIGITAL ECOSYSTEMS / Smart Innovation, Systems and Technologies. Singapore: Springer, 2021. V.200. Pp. 439-449. SCOPUS
- Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. Digital Ecosystems Control Based on Predictive Real-Time Situational Models / Advances in Intelligent Systems and Computing (Proceedings of the 2021 Future of Information and Communication Conference (FICC), Volume 1). Cham, Switzerland: Springer, 2021. V. 1363 . С. 605-623. SCOPUS

Публикации. Перечень (продолжение)

- Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С., Елпашев Д.В., Сабитов Р.А., Сабитов С., Смирнова Г.С., Kuchinskii M. Management Projects for Digital Ecosystems of Automotive Enterprises: Truck Sharing / IFIP Advances in Information and Communication Technology. Nantes, France: Springer, 2021. Volume 630. Pp. 563–571. WoS, SCOPUS
- Н.Н. Бахтадзе, В.А. Бегинюк, Д.В. Елпашев, Э.А. Захаров, Д.М. Дончан, З.Г. Салихов, В.Е. Пятецкий (2022). Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи. Заводская лаборатория и диагностика материалоов. № 1(1), стр. 98-110. SCOPUS
- Alexander Suleykin, Natalya Bakhtadze, Denis Elpashev, (2021). Associative Rules-Driven Intelligent Production Schedule Control System for Digital Manufacturing Ecosystem. MIM'2022 (in press). WoS, SCOPUS (принято к публикации).
- Dmitry Novikov, Natalya Bakhtadze, Denis Elpashev, Alexander Suleykin (2022). Integrated Resource Management in the Digital Ecosystem of the Enterprise Based on Intelligent Consorts. MIM'2022 (in press). WoS, SCOPUS (принято к публикации).
- Natalia Bakhtadze, Vitaly A. Beginjuk, Denis V. Elpashev, Eddy A. Zakharov, Danila M. Donchan, Zufar G. Salikhov, Alexey Cheresheko (2022). Intelligent Decision Support System Based on Video Recognition of Tuyere Hearth in a Blast Furnace. MIM'2022 (принято к публикации) WoS, SCOPUS.
- Кутяков Е.Ю., Душин С.В., Исаков А.Б., Абраменков А.Н. Taylor Series Decomposition of Nonlinear Model of Two-area Four-generator Power System / Proceedings of the 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA2021, Lipetsk). Lipetsk, Russia: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9632231> SCOPUS
- Галяев И.А., Маштаков А.П. Liouville Integrability in a Four-Dimensional Model of the Visual Cortex // Journal of Imaging. 2021. V. 7. No. 12. С. 277 <https://www.mdpi.com/2313-433X/7/12/277>. Q1 WoS, SCOPUS.
- Igor Yadykin, Nikita Tomin, Alexey Isakov, Ivan Galyaev "Optimal Adaptive Control of Electromechanical Oscillations Modes in Power Systems" 11th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems, CPES 2022 (принято к публикации WoS, SCOPUS).
- Ядыкин И.Б., Галяев И.А., Вершинин Ю.А. О решении обобщенных уравнений Ляпунова для одного класса непрерывных билинейных нестационарных систем Автоматика и телемеханика. №5. 2022 (принято к публикации WoS, SCOPUS).
- Галяев И.А., Маштаков А.П. "Liouville Integrability in a Left-Invariant Four-Dimensional Model of the Visual Cortex" Подготовлена к публикации в mdpi. journal of imaging. Q1 WoS, SCOPUS

Публикации. Сводные данные

Всего **19 работ**, из них:

- WoS: 12 (в т.ч. 3 работы в Q1)
- Scopus: 6
- РИНЦ: 1

Отчёт о работе в рамках Молодёжной научной школы

Построение квадратичной аппроксимации
многогенераторной электроэнергетической
системы в пространстве состояний методом
линеаризации Карлемана

Кутяков Е.Ю.

Лаборатория 82

Краткая мотивация

- Необходимость использования моделей электроэнергетических систем (ЭЭС), учитывающих члены второго и более высоких порядков малости, связана с аналитическим исследованием нелинейных модальных взаимодействий, в частности межрайонных колебаний.
- Межрайонные колебания в ЭЭС возникают между несколькими удалёнными друг от друга группами генераторов, и проявляются при существенных возмущениях в системе, когда линеаризованная модель уже не работает.
- В литературе отсутствуют подробно описанные квадратичные (и иные, более высоких порядков) аппроксимации модели ЭЭС в пространстве состояний, поэтому задача построения такой модели и разработки соответствующего ПО является актуальной.

Линеаризация Карлемана

Рассмотрим нелинейную динамическую систему в пространстве состояний:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

$\mathbf{F}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ нелинейная функция; $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$;
 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$.

Билинеаризованное уравнение динамики для системы (1) имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}(t) + \sum_{i=1}^m \hat{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{x}}(t)u_i + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(1)} \\ \mathbf{x}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{x}^{(N)} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{A}_N \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{21} & \cdots & \mathbf{A}_{2,N-1} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N1} \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_{20} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{B}_{N0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$\dim \hat{\mathbf{x}} = \sum_{k=1}^N n^k$, N – количество учитываемых членов при разложении в ряд Тейлора функции $\mathbf{F}(\mathbf{x})$

$$\mathbf{x}^{(i)} = \underbrace{\mathbf{x} \otimes \cdots \otimes \mathbf{x}}_{i-1 \text{ раз}} \quad (3)$$

\mathbf{A}_i – матрица коэффициентов Тейлора функции \mathbf{F} в точке \mathbf{x}_0 при членах i -го порядка

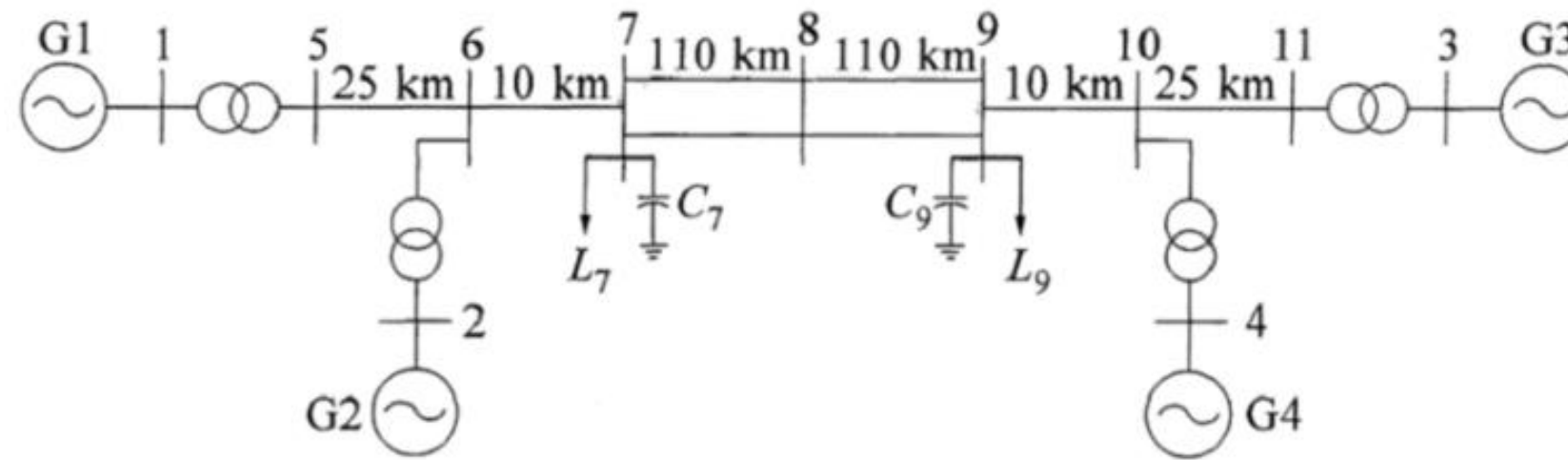
$$\mathbf{A}_{ji} = \mathbf{A}_i \otimes \mathbf{I} \otimes \cdots \otimes \mathbf{I} + \mathbf{I} \otimes \mathbf{A}_i \otimes \cdots \otimes \mathbf{I} + \cdots + \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \otimes \cdots \otimes \mathbf{A}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_{j0} = \mathbf{B} \otimes \mathbf{I} \otimes \cdots \otimes \mathbf{I} + \mathbf{I} \otimes \mathbf{B} \otimes \cdots \otimes \mathbf{I} + \cdots + \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \otimes \cdots \otimes \mathbf{B} \quad (5)$$

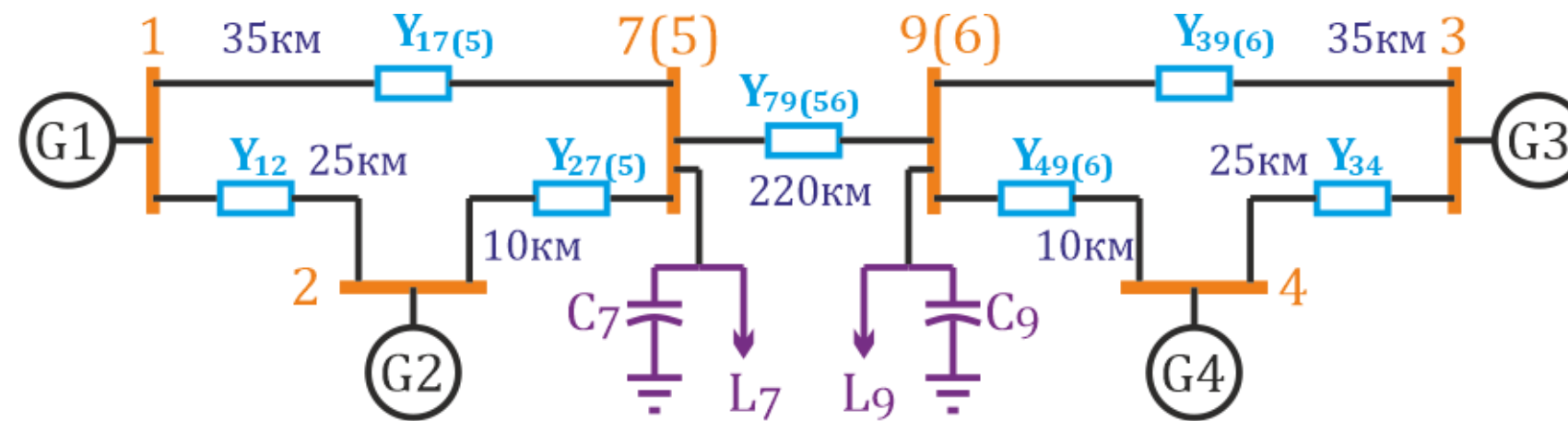
\mathbf{I} – единичная матрица размером $n \times n$
 \otimes – произведение Кронекера

Схема моделируемой ЭЭС

Исходная схема сети



Эквивалентная схема сети



Общий вид модели k-го динамического устройства (генератора):

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= f(x_k, V_k) \\ I_k &= g(x_k, V_k) \end{aligned}$$

Общий вид модели i-го статического устройства (нагрузки):

$$I_i = h(V_i)$$

Нелинейная модель двухрайонной ЭЭС на базе модели генератора бго порядка

4 x

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ЭЭС

Модель генератора бго порядка

Уравнения динамики

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = -\frac{K_D}{2H}\Delta\omega_r - \frac{\psi_{ad}i_q - \psi_{aq}i_d}{2H} + \frac{T_m}{2H}; \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0\Delta\omega_r; \\ \frac{d\psi_{fd}}{dt} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}}(\psi_{fd} - \psi_{ad}) + \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}E_{fd}; \\ \frac{d\psi_{1d}}{dt} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}}(\psi_{1d} - \psi_{ad}); \\ \frac{d\psi_{1q}}{dt} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}}(\psi_{1q} - \psi_{aq}); \\ \frac{d\psi_{2q}}{dt} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}}(\psi_{2q} - \psi_{aq}); \end{cases} \quad (6)$$

Токи статора как функция от переменных
СОСТОЯНИЯ

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{L_{qs}}{K_{LR}} \left[L''_{ads} \left[\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right] - v_I \sin \delta - v_R \cos \delta \right] - \\ &\quad \frac{R_a}{K_{LR}} \left[L''_{aqs} \left[\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right] + v_R \sin \delta - v_I \cos \delta \right] \\ i_q &= \frac{R_a}{K_{LR}} \left[L''_{ads} \left[\frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right] - v_I \sin \delta - v_R \cos \delta \right] + \\ &\quad \frac{L_{ds}}{K_{LR}} \left[L''_{aqs} \left[\frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right] + v_R \sin \delta - v_I \cos \delta \right] \end{aligned}$$

Уравнения токов

$$\begin{cases} I_R = i_d \sin(\delta) + i_q \cos(\delta) \\ I_I = i_q \sin(\delta) - i_d \cos(\delta) \end{cases} \quad (7)$$

Взаимные потокосцепления как
функция от переменных состояния

$$\begin{aligned} \psi_{ad} &= L''_{ads} \cdot \left(-i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \\ \psi_{aq} &= L''_{aqs} \cdot \left(-i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \end{aligned}$$

2 x

Модель нелинейной статической нагрузки

$$\begin{cases} I_{Rk} = \frac{P_{L0(k)}}{V_{0(k)}} \cdot \frac{v_{Rk}}{|V_k|} + \frac{Q_{L0(k)}}{V_{0(k)}^2} \cdot v_{Ik} \\ I_{Ik} = \frac{P_{L0(k)}}{V_{0(k)}} \cdot \frac{v_{Ik}}{|V_k|} - \frac{Q_{L0(k)}}{V_{0(k)}^2} \cdot v_{Rk} \end{cases} \quad (8)$$

Квадратичное приближение исходной нелинейной системы в векторно-матричном виде

$$(9) \begin{cases} \Delta \dot{x} = A_D \Delta x + B_D \Delta V + A_D^{(2)} \Delta x^{(2)} + B_D^{(2)} \Delta V^{(2)} + H_D V_x \\ \Delta I = C_D \Delta x + D_D \Delta V + C_D^{(2)} \Delta x^{(2)} + S_D V_x \end{cases}$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} x_{G(1)} \\ x_{G(2)} \\ x_{G(3)} \\ x_{G(4)} \end{bmatrix}; \quad \Delta x_{G(i)} = \begin{bmatrix} \Delta \omega_{(i)} \\ \Delta \delta_{(i)} \\ \Delta \psi_{fd(i)} \\ \Delta \psi_{1d(i)} \\ \Delta \psi_{1q(i)} \\ \Delta \psi_{2q(i)} \end{bmatrix}; \quad \Delta I = \begin{bmatrix} \Delta I_{(1)} \\ \Delta I_{(2)} \\ \Delta I_{(3)} \\ \Delta I_{(4)} \\ \Delta I_{(7)} \\ \Delta I_{(9)} \end{bmatrix}; \quad \Delta x^{(2)} = \begin{bmatrix} x_{G(1)} \otimes x_{G(1)} \\ x_{G(2)} \otimes x_{G(2)} \\ x_{G(3)} \otimes x_{G(3)} \\ x_{G(4)} \otimes x_{G(4)} \end{bmatrix}; \quad \Delta V^{(2)} = \begin{bmatrix} \Delta V_{(1)} \otimes \Delta V_{(1)} \\ \Delta V_{(2)} \otimes \Delta V_{(2)} \\ \Delta V_{(3)} \otimes \Delta V_{(3)} \\ \Delta V_{(4)} \otimes \Delta V_{(4)} \\ \Delta V_{(7)} \otimes \Delta V_{(7)} \\ \Delta V_{(9)} \otimes \Delta V_{(9)} \end{bmatrix}; \quad \Delta V_x = \begin{bmatrix} \Delta V_{(1)} \otimes x_{G(1)} \\ \Delta V_{(2)} \otimes x_{G(2)} \\ \Delta V_{(3)} \otimes x_{G(3)} \\ \Delta V_{(4)} \otimes x_{G(4)} \end{bmatrix}$$

Разложение в ряд Тейлора

Уравнение динамики (1-е уравнение в (9))

Общая структура

$$\begin{aligned} A_D &= (A_{G(1)} \quad A_{G(2)} \quad A_{G(3)} \quad A_{G(4)}) \\ B_D &= [diag(B_{G(1)} \quad B_{G(2)} \quad B_{G(3)} \quad B_{G(4)})_{[24 \times 8]} \quad O_{[24 \times 4]}] \\ A_D^{(2)} &= diag(A_{G(1)}^{(2)} \quad A_{G(2)}^{(2)} \quad A_{G(3)}^{(2)} \quad A_{G(4)}^{(2)}) \\ B_D^{(2)} &= [diag(B_{G(1)}^{(2)} \quad B_{G(2)}^{(2)} \quad B_{G(3)}^{(2)} \quad B_{G(4)}^{(2)})_{[24 \times 16]} \quad O_{[24 \times 8]}] \\ H_D &= diag(H_{G(1)} \quad H_{G(2)} \quad H_{G(3)} \quad H_{G(4)}) \end{aligned}$$

Структура i-х блоков

$$\begin{aligned} A_{G(i)} &= [a_{kl}]_{l=1 \dots 6}^{k=1 \dots 6}, & A_{G(i)}^{(2)} &= [a_{kl}^{(2)}]_{l=1 \dots 36}^{k=1 \dots 6}, \\ B_{G(i)} &= [b_{kl}]_{l=1 \dots 2}^{k=1 \dots 6}, & H_{G(i)} &= [h_{kl}]_{l=1 \dots 12}^{k=1 \dots 6}, \\ B_{G(i)}^{(2)} &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ O_{[5 \times 1]} & O_{[5 \times 1]} & O_{[5 \times 1]} & O_{[5 \times 1]} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Уравнение токов (2-е уравнение в (9))

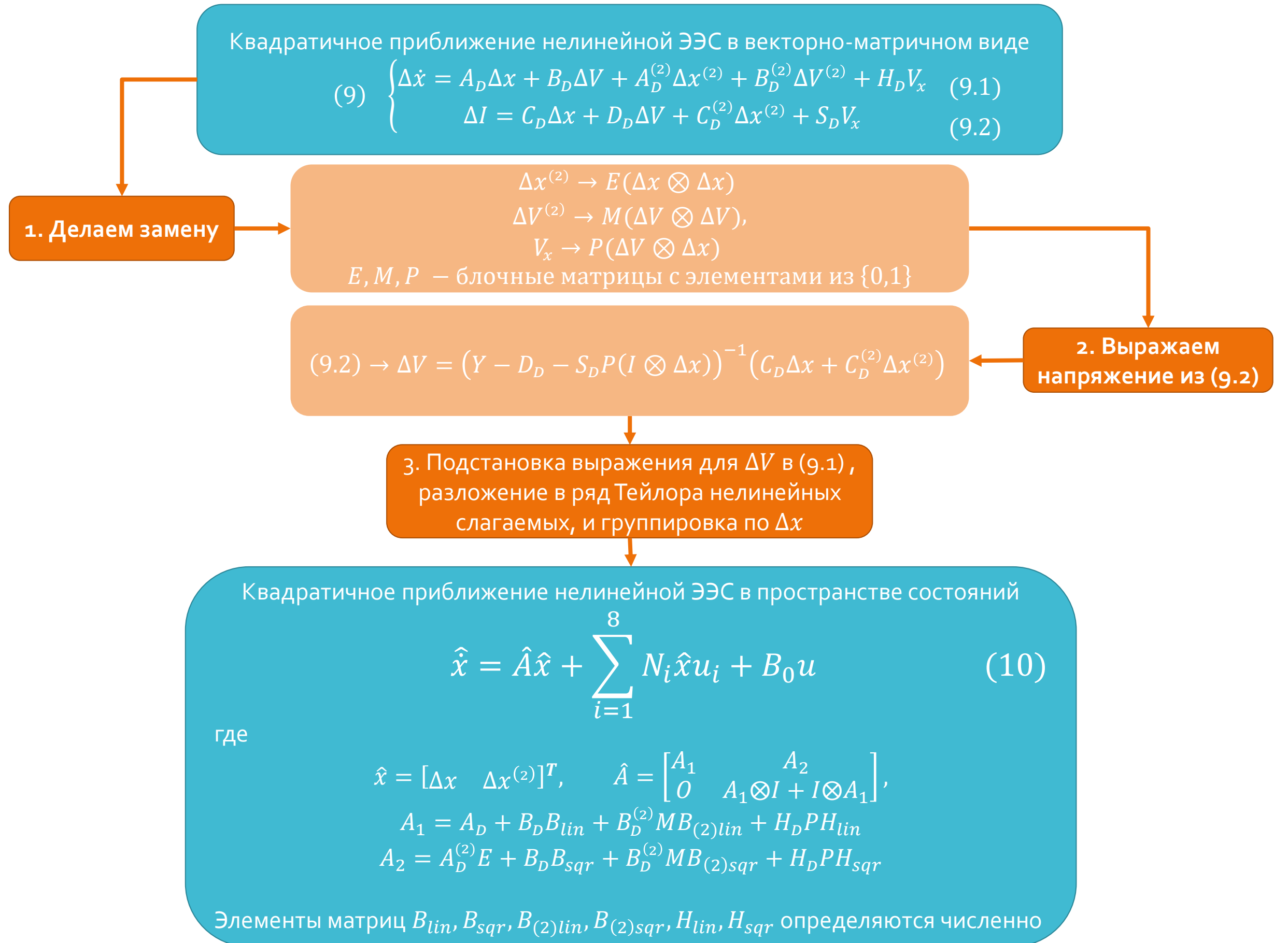
Общая структура

$$\begin{aligned} C_D &= \begin{bmatrix} diag(C_{G(1)} \quad C_{G(2)} \quad C_{G(3)} \quad C_{G(4)})_{[8 \times 24]} \\ O_{[4 \times 24]} \end{bmatrix}, \\ D_D &= diag(D_{G(1)} \quad D_{G(2)} \quad D_{G(3)} \quad D_{G(4)} \quad D_{L(7)} \quad D_{L(9)}) \\ C_D^{(2)} &= \begin{bmatrix} diag(C_{G(1)}^{(2)} \quad C_{G(2)}^{(2)} \quad C_{G(3)}^{(2)} \quad C_{G(4)}^{(2)})_{[8 \times 144]} \\ O_{[4 \times 144]} \end{bmatrix} \\ S_D &= \begin{bmatrix} diag(S_{G(1)} \quad S_{G(2)} \quad S_{G(3)} \quad S_{G(4)})_{[8 \times 48]} \\ O_{[4 \times 48]} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

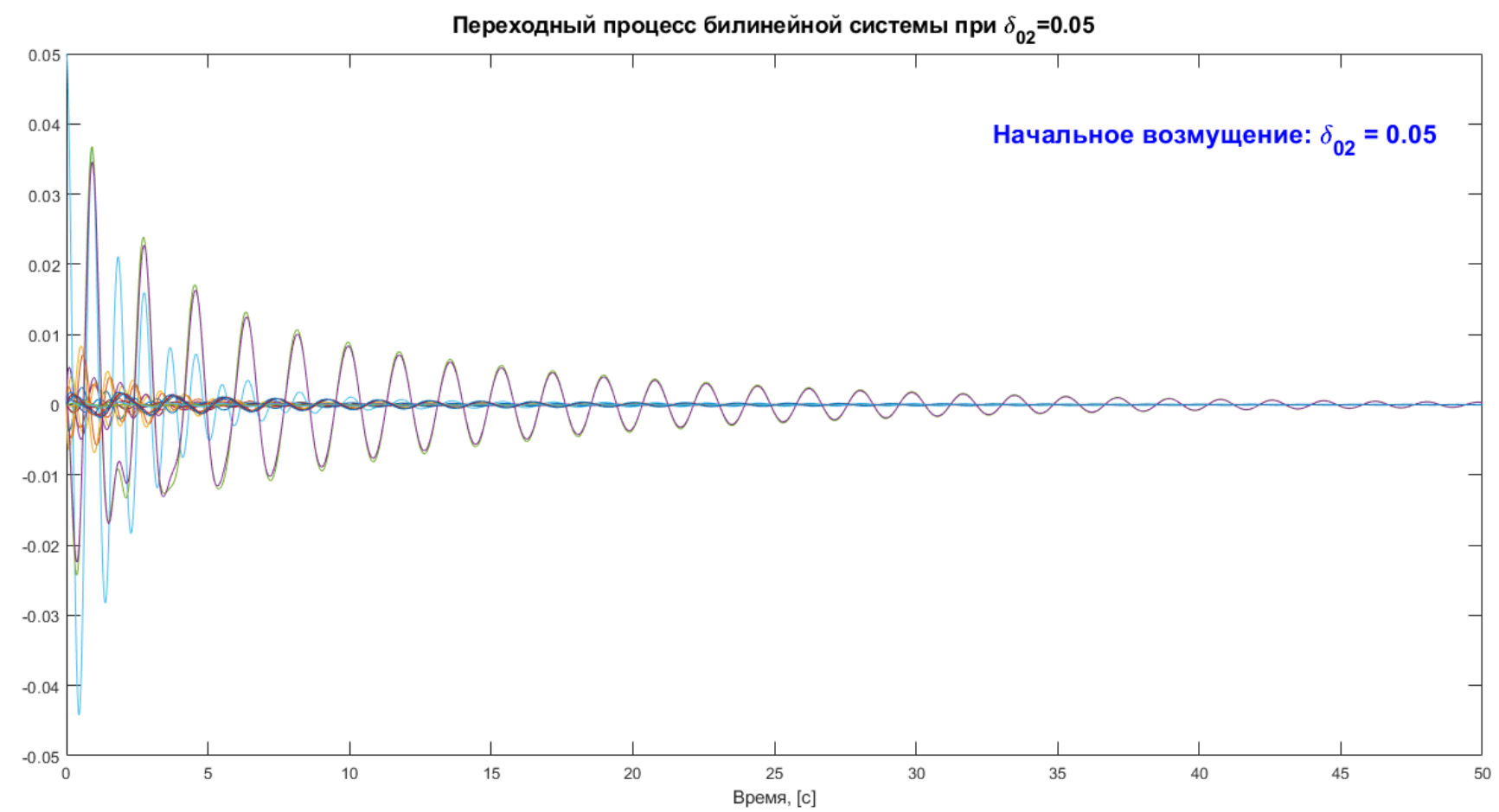
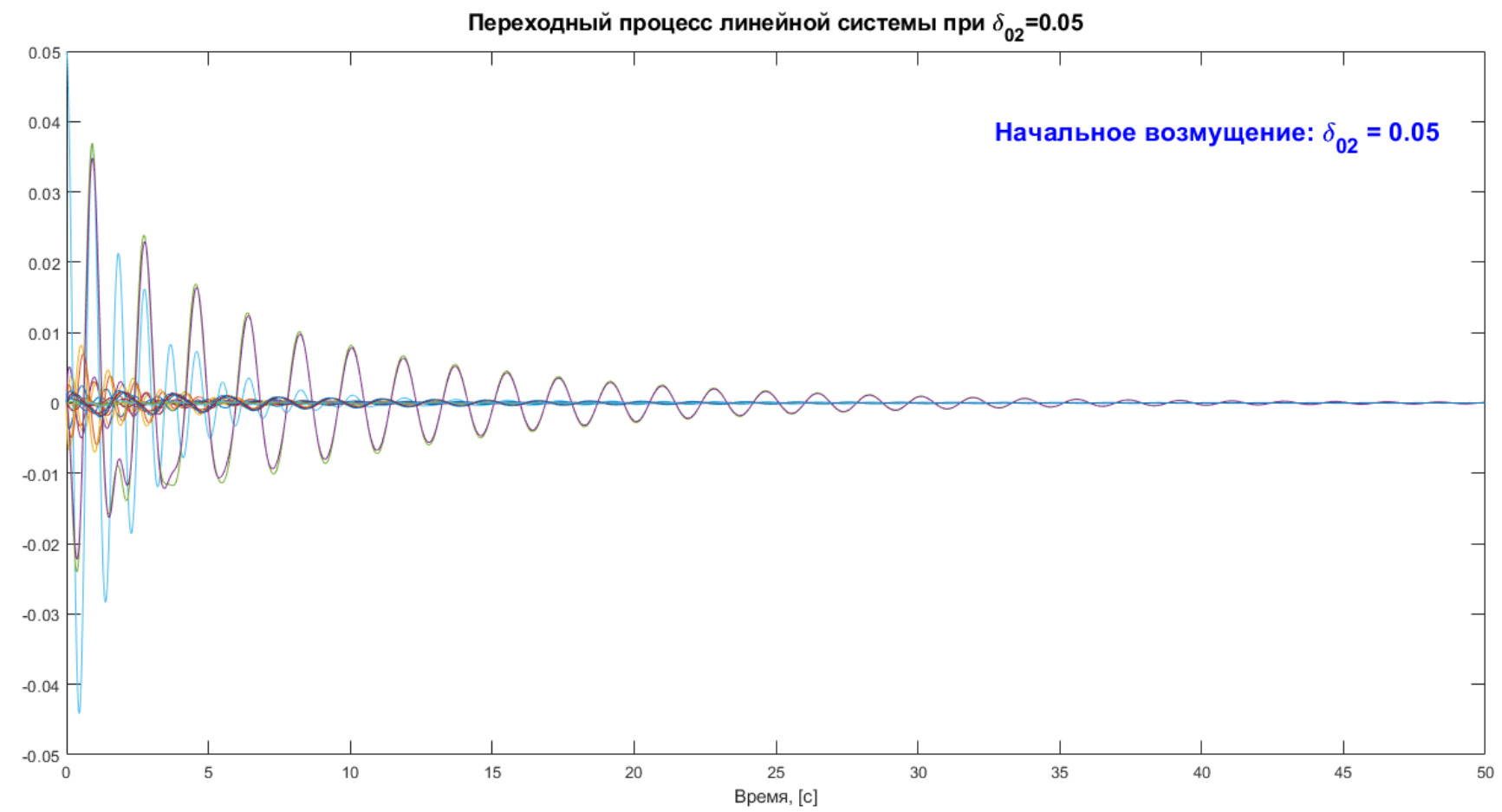
Структура i-х блоков

$$\begin{aligned} C_{G(i)} &= [c_{kl}]_{l=1 \dots 6}^{k=1 \dots 2}, & C_{G(i)}^{(2)} &= [c_{kl}^{(2)}]_{l=1 \dots 36}^{k=1 \dots 2}, \\ D_{G(i)} &= [d_{(G)kl}]_{l=1 \dots 2}^{k=1 \dots 2}, & D_{L(i)} &= [d_{(L)kl}]_{l=1 \dots 2}^{k=1 \dots 2}, \\ S_{G(i)} &= [s_{kl}]_{l=1 \dots 12}^{k=1 \dots 2} \end{aligned}$$

Переход к пространству состояний

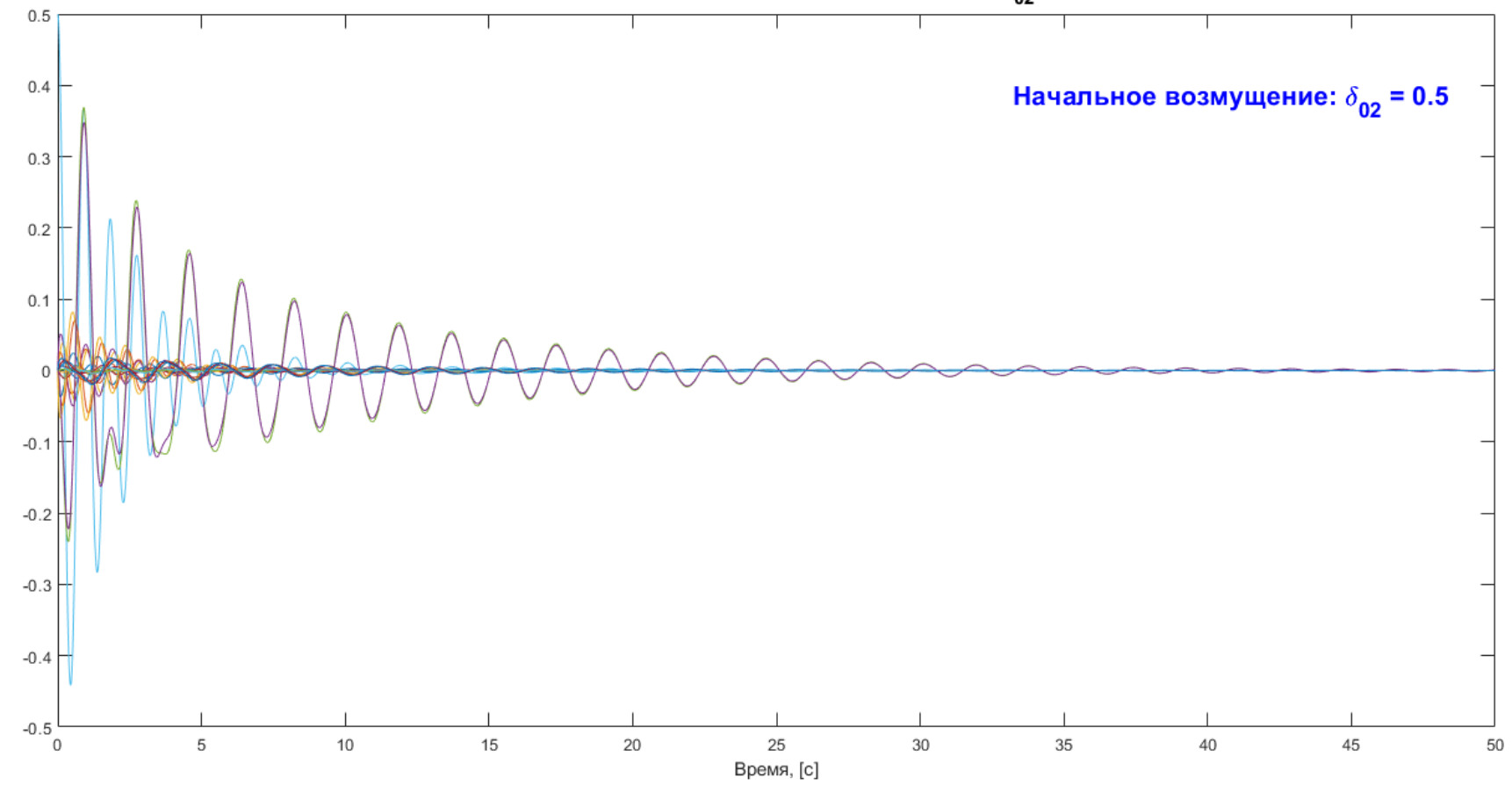


Верификация

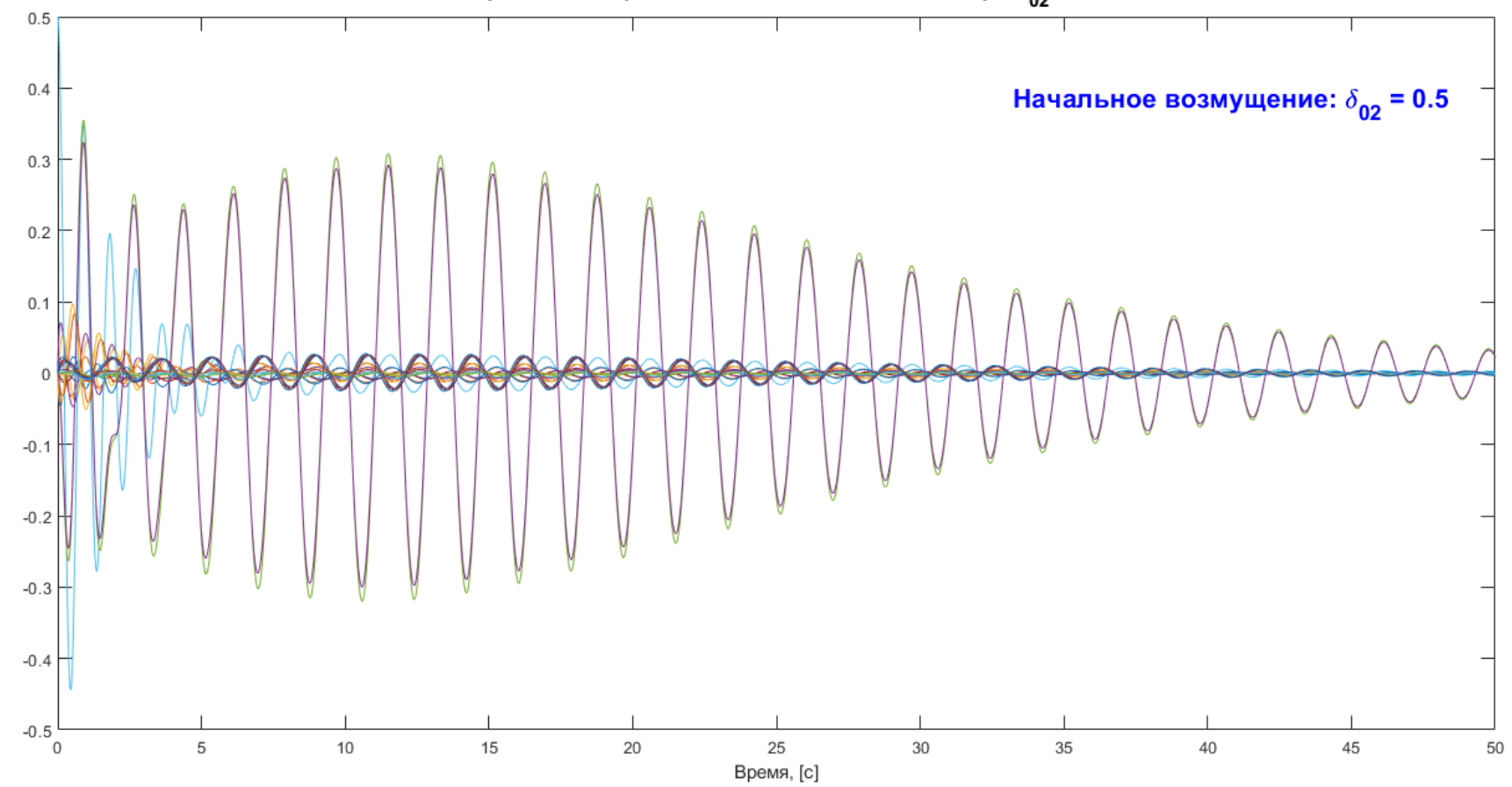


Верификация

Переходный процесс линейной системы при $\delta_{02}=0.5$



Переходный процесс билинейной системы при $\delta_{02}=0.5$



Выводы и перспективы

1. Получена математическая модель 4х генераторной ЭЭС, учитывающая члены 1-го и 2-го порядка малости в пространстве состояний с подробным описанием элементов матрицы динамики.
2. Разработано программное обеспечение, позволяющее в автоматическом режиме получать линейные и квадратичные аппроксимации исследуемой ЭЭС.
3. Разработанная модель может быть использована для демонстрации техники применения новых методов анализа межрайонных колебаний в крупных энергосистемах и их сравнения с традиционными методами.
4. Дальнейшие исследования будут связаны с усложнением имеющейся модели, в частности с оснащением каждого генератора регулятором напряжения и стабилизатором, что повысит точность модели, приблизив её к реальной конструкции современных ЭЭС.

Результаты докладывались на конференции 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA2021, Липецк) и на лабораторных семинарах.

Одна публикация в Scopus.

Спасибо за внимание!

Галяев Иван Андреевич
Инженер лаборатории № 82,
студент 2 курса магистратуры МФТИ
по направлению 03.04.01

- Бакалавр МФТИ
- Прошёл курсы повышения квалификации от университета "Сириус" по направлению "Современные методы теории информации, оптимизации и управления"
- Руководитель шахматного клуба ИПУ



Постановка задачи

Уравнения динамики

$$\begin{cases} \dot{x} = u_1 \cos \theta, \\ \dot{y} = u_1 \sin \theta, \\ \dot{\theta} = u_1 k, \\ \dot{k} = u_2, \end{cases} \quad (u_1, u_2) \in R^2,$$

$$(x, y, \theta, k) = q \in SE(2) \times R = M.$$

Краевые условия

$$\begin{aligned} \gamma(0) &= q_0 = (x_0, y_0, \theta_0, k_0)^T, \\ \gamma(T) &= q_1 = (x_1, y_1, \theta_1, k_1)^T. \end{aligned}$$

Критерий

$$I = \int_0^T \sqrt{u_1^2(t) + u_2^2(t)} dt \rightarrow \min.$$

Геометрический подход к ЗОУ

Система векторных полей:

$$\begin{aligned} X_1 &= (\cos \theta, \sin \theta, k, 0)^T, \\ X_2 &= (0, 0, 0, 1)^T. \end{aligned}$$

Система ПМП:

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = -h_2 h_3, \\ \dot{h}_2 = h_1 h_3, \\ \dot{h}_3 = h_1 h_4, \\ \dot{h}_4 = -kh_1(kh_3 + h_1). \end{cases}$$

Условие максимума:

$$u_1 h_1 + u_2 h_2 + \nu/2 (u_1^2 + u_2^2) \rightarrow \max_{u \in R^2}.$$

Аномальный случай

$$\begin{cases} \dot{a} = 0, \\ \dot{b} = 0, \\ \dot{c} = -u_1(-a \sin \theta + b \cos \theta), \\ \dot{d} = -u_1 c. \end{cases} \quad \begin{cases} a \cos \theta + b \sin \theta + ck \equiv 0, \\ d \equiv 0. \end{cases}$$

Теорема

Натурально параметризованные аномальные экстремальные траектории в задаче имеют вид $\gamma(t) = (0, 0, 0, \pm t)$. Эти траектории оптимальны.

Нормальный случай

$$\begin{cases} \dot{x} = h_1 \cos \theta, \\ \dot{y} = h_1 \sin \theta, \\ \dot{\theta} = h_1 k, \\ \dot{k} = h_2, \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{h}_1 = -h_2 h_3, \\ \dot{h}_2 = h_1 h_3, \\ \dot{h}_3 = h_1 h_4, \\ \dot{h}_4 = -kh_1(kh_3 + h_1). \end{cases} \quad (1)$$

Теорема

Четвертый независимый первый интеграл существует и гамильтонова система интегрируема по Лиувиллю.

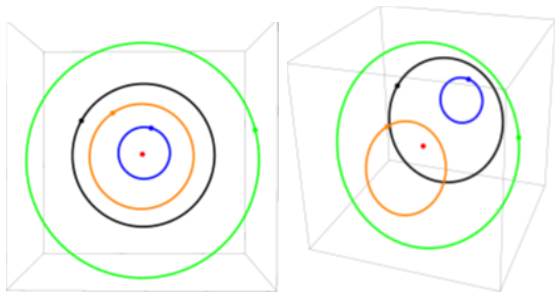


Рис. 1: Орбиты отображения Пуанкаре в пространстве $(\arccos h_1, h_3, h_4)$, образованные точками пересечения трансверсального гиперпространства $k = 0$ с траекториями, близкими к периодической.

Результаты

- 1 Доказана полная управляемость системы и существование оптимальных управлений.
- 2 Получена гамильтонова система ПМП.
- 3 Найдена явная параметризация аномальных траекторий. В нормальном случае найдены три функционально независимых первых интеграла.
- 4 Сформулирована гипотеза, подтвержденная численными экспериментами: нормальная гамильтонова система ПМП интегрируема по Лиувиллю.

Планы

- 1 Исследовать левоинвариантную четырехмерную модель зрительной коры головного мозга.
- 2 Найти полную зависимость между параметрами векторных полей и интегрируемостью системы.
- 3 Разработать нейросеть для качественной оценки моделей.
- 4 Провести сравнение между существующими трехмерными моделями и полученными четырехмерными моделями.

Публикации в журналах

- 1 Галяев И.А., Маштаков А.П. Liouville Integrability in a Four-Dimensional Model of the Visual Cortex // Journal of Imaging. 2021. V. 7. No. 12. С. 277 DOI: 10.3390/jimaging7120277
- 2 Ядыкин И.Б., Галяев И.А., Вершинин Ю.А. О решении обобщенных уравнений Ляпунова для одного класса непрерывных билинейных нестационарных систем Автоматика и телемеханика. №5. 2022 (в печати)
- 3 Галяев И.А., Маштаков А.П. Liouville Integrability in a Left-Invariant Four-Dimensional Model of the Visual Cortex (готовится, как приглашенная статья в Journal of Imaging)

Симпозиум

- 4 Igor Yadykin, Nikita Tomin, Alexey Isakov, Ivan Galyaev "Optimal Adaptive Control of Electromechanical Oscillations Modes in Power Systems" submitted to 11th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems, CPES 2022. (состоится в июне)

Доклад

- 1 Галяев И.А., Маштаков А.П. Интегрируемость по Лиувиллю в субримановой структуре на центральном расширении $SE(2)$. 64-й Всероссийская научная конференция МФТИ "Радиотехника и компьютерные технологии". Москва. 2021.

Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи

Эдуард Александрович Захаров,
научный сотрудник лаборатории 4I

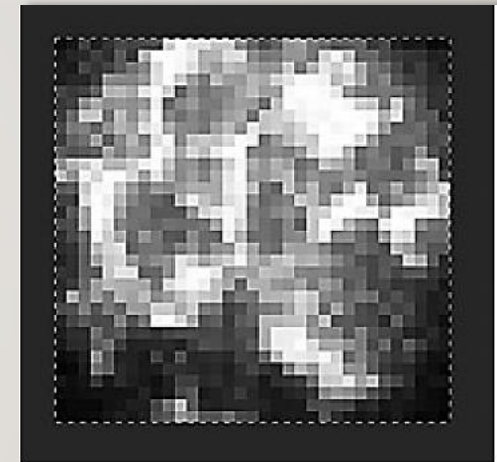
Результаты:

Представлен **подход к созданию и исследованию функционирования автоматизированной системы распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи.**

- Разработаны **методы обработки и анализа данных видеопотока изображений технологического процесса доменной плавки на основе кластерного анализа и вейвлет-анализа, а также методы формирования индуктивных знаний (закономерностей, извлекаемых на основе интеллектуального анализа данных).**
- Предложены **методы интеллектуального анализа и прогнозирования в реальном времени для сценариев изменения состояний технологического процесса.**
- Представлены **методические примеры функционирования алгоритма распознавания: отнесение видеофрагмента к одному из классов, отражающих технологические ситуации, близкие к «типовым», определенным экспертами на этапе обучения.**

Стадии работы системы прогнозирования

1. Предварительная обработка видеофайлов;
2. Преобразование данных для частотно-временного представления;
3. Кластерный анализ множества вейвлет-отпечатков;
4. Метки для кластеров сценариев изменения состояния технологического процесса;
5. Прогнозирование динамики состояния технологического процесса



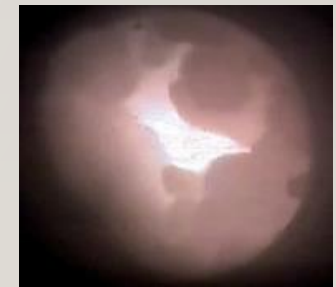
Строится **RGB**-модель
цветного изображения

Пронумерованные кластерные метки цепочек видеофрагментов

t	$t + 1$	$t + 2$	$t + 3$	$t + 4$	$t + 5$	$t + 6$	$t + 7$	$t + 8$	$t + 9$
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i>
			<i>ABBB</i>	<i>BBBA</i>	<i>BBA A</i>	<i>BAAC</i>	<i>AACC</i>	<i>ACCD</i>	<i>CCDA</i>
			1	2	3	4	5	6	7

Продолжение работы

1. Доработать Систему распознавания, постоянно до-обучаемую в ходе реального функционирования процесса,
2. Разработать алгоритмы сценарного прогнозирования изменения состояний ТП на основе методов интеллектуального анализа данных
3. На основе интеллектуального прогнозирования в реальном времени сценариев ТП разработать подсистему корректирования в реальном времени управления режимом работы печи

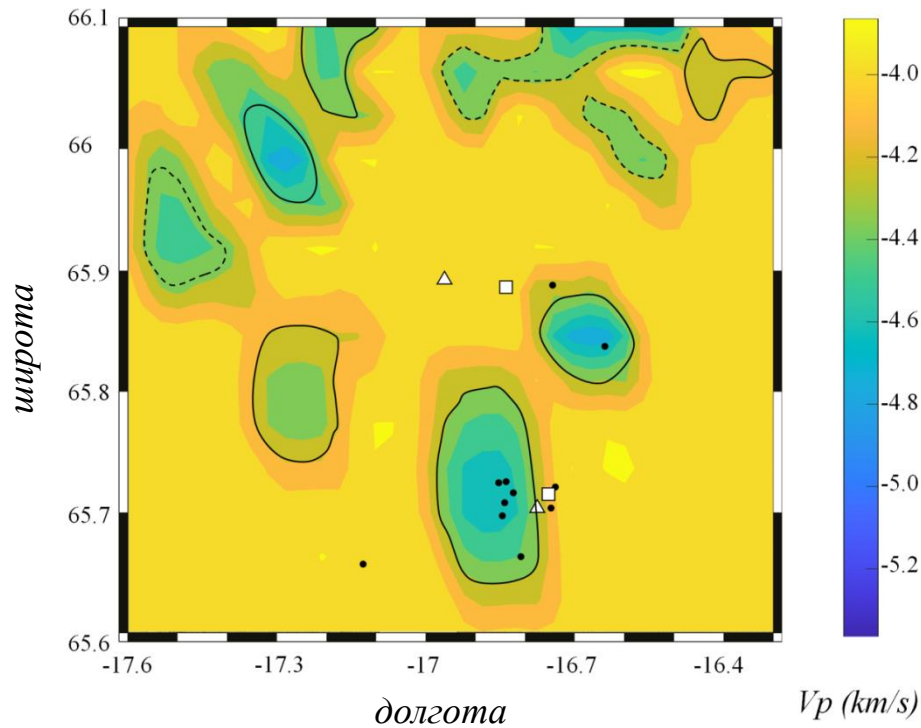


Публикации

- Н.Н. Бахтадзе, В.А. Бегинюк, Д.В. Елпашев, Э.А. Захаров, Д.М. Дончан, З.Г. Салихов, В.Е. Пятецкий (2022). Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе распознавания видеообразов фурменных очагов доменной печи. Заводская лаборатория и диагностика материаов. № 1(1), стр. 98-110. SCOPUS
- Natalia Bakhtadze, Vitaly A. Beginjuk, Denis V. Elpashev, Eddy A. Zakharov, Danila M. Donchan, Zufar G. Salikhov, Alexey Cheresenko (2022). Intelligent Decision Support System Based on Video Recognition of Tuyere Hearth in a Blast Furnace. MIM'2022 (принято к публикации) WoS, SCOPUS.

Разработка параметра разрешения численного метода ВВК для идентификации крупномасштабных неоднородностей APMS 2021 (WoS, Scopus)

Смагличенко А.В. с.н.с, лаборатория №41

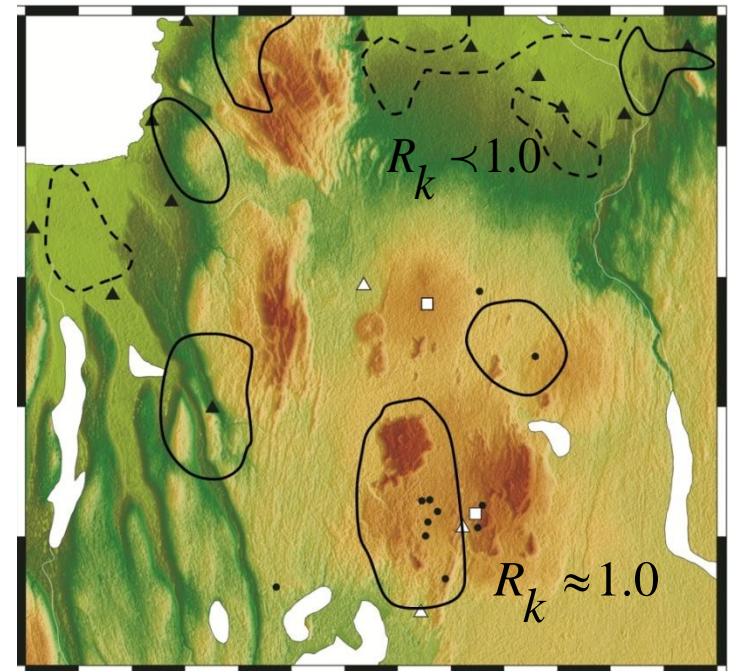


Аномалии хорошо определяются при

$$R_k \approx 1.0$$

и не определяются, в случае

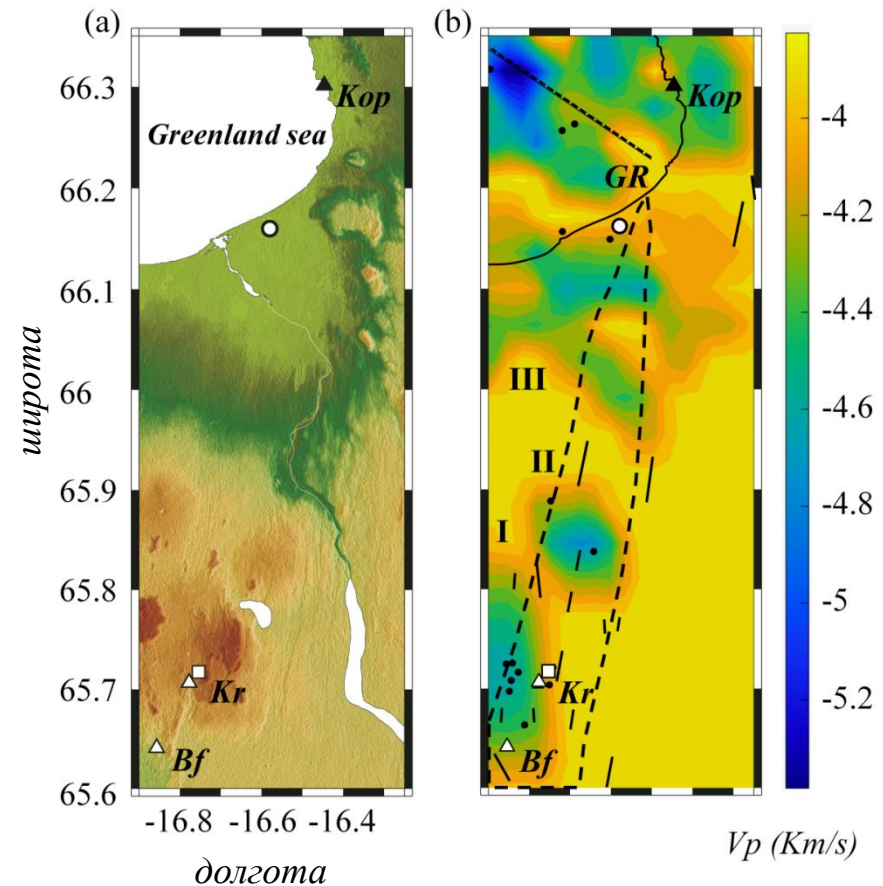
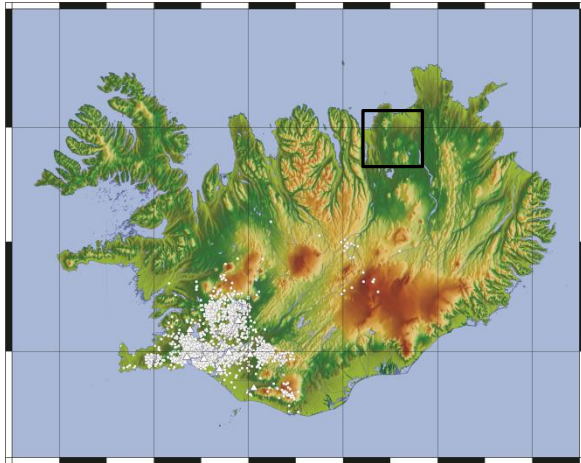
$$R_k < 1.0$$



Значения параметра разрешения R_k и результаты идентификации сейсмических объектов

Риски производственных процессов бурения скважин. Применение нового алгоритма ВВК. MLSD 2021 (Scopus)

Разработан релаксационный алгоритм, позволяющий повысить точность вычислений при использовании начального ненулевого приближения.



Эффективность метода была улучшена благодаря привлечению информации из смежных областей (данные гравиметрии). Получен возможный сценарий возникновения крупного землетрясения в регионе бурения (пример геотермальных скважин Крафла).

Разработан алгоритм РПСС для улучшения геопозиционирования по данным спутниковых систем GPS, GLONASS

MIM 2022 (WoS, Scopus)

Определен параметр k , регулирующий влияние числа кластеров близких измерений на погрешность позиционирования.

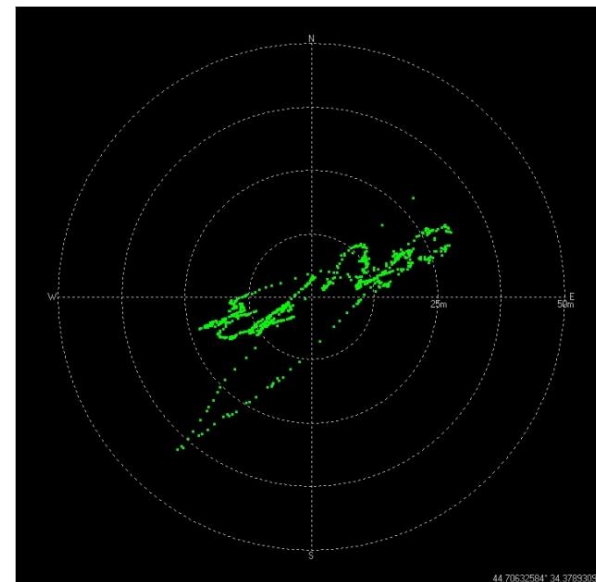
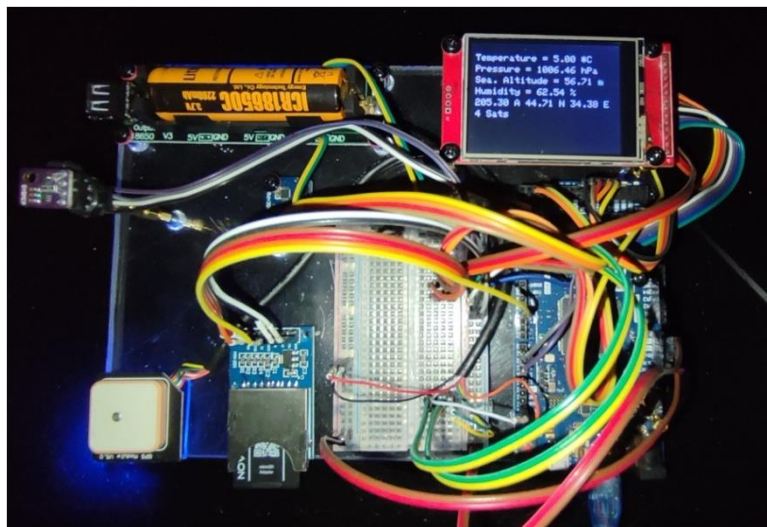
Системы GPS + GLONASS

начальное отклонение 12.9 метров

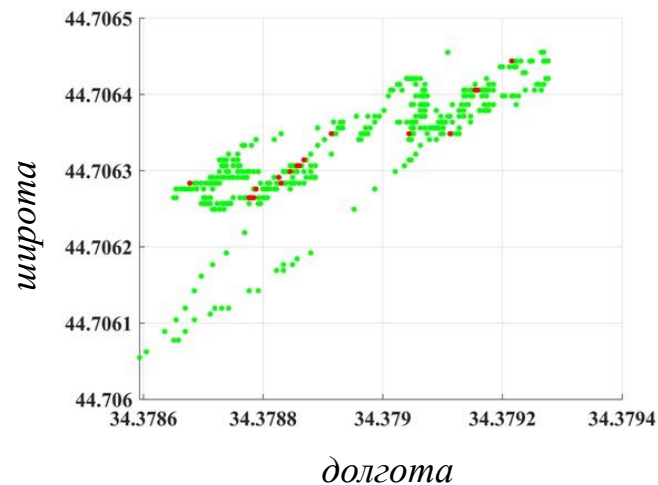
$k=3$: отклонение 12.47 м (4%)

$k=5$: отклонение 10.553 м (18%)

$k=8$: отклонение 10.553 м (27%)



Ublox u-center v. 21.09



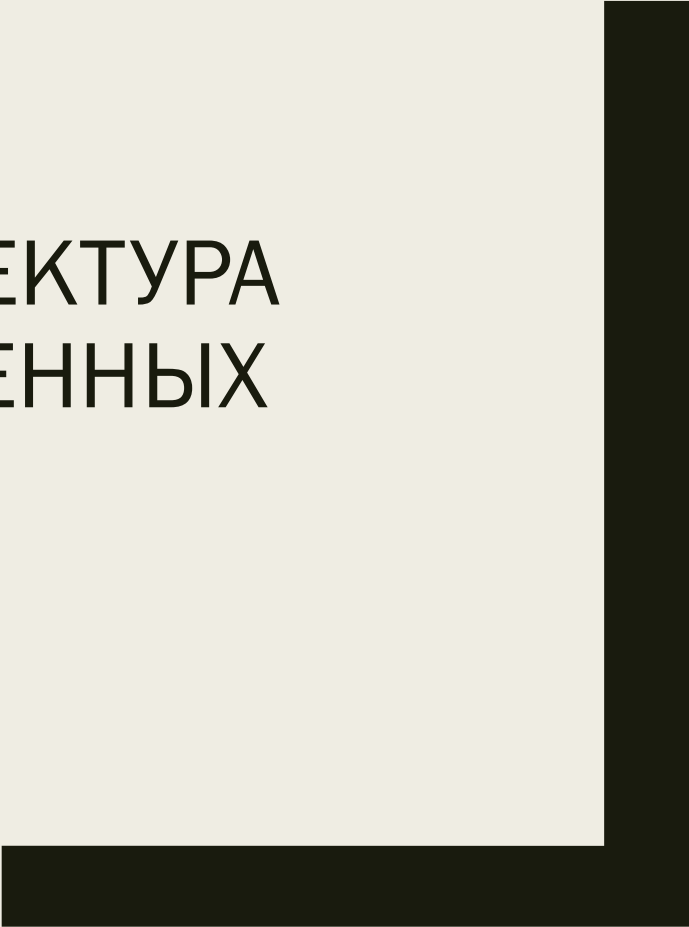
ВЫВОДЫ

- *Разработанный параметр разрешения необходим в практике идентификации крупномасштабных неоднородностей, возникающих в различных сферах производства (при бурении, в дефектоскопии, при покрытие изделия защитным слоем и т.д.)*
- *Новый алгоритм метода ВВК способен улучшить определение производственных рисков возникновения сильного землетрясения в результате процессов бурения*
- *Определен и протестирован новый подход с целью улучшения геопозиции по данным спутниковых систем в дополнение к популярному фильтру Калмана.*



МЕТОДЫ АНАЛИЗА И АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

Сулейкин Александр Сергеевич,
научный сотрудник лаб.41

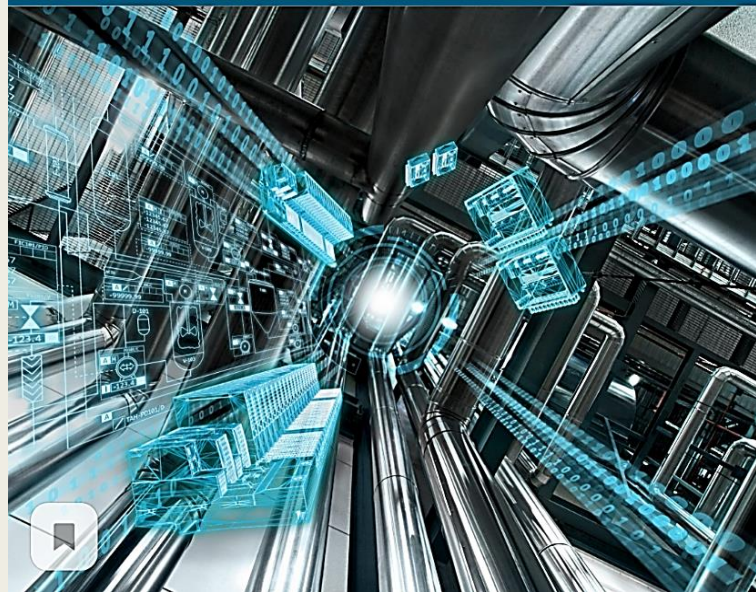


Цифровизация и интеллектуальные системы управления производством

Результаты цифровизации производственных систем

- Становится возможным и востребованным управление, основанное на анализе данных
- От пакетной - к потоковой обработке данных
- Data Fusion – для слияния гетерогенных данных
- Надстройки над Цифровыми платформами – для управления

Цифровизация технологических и бизнес-процессов, цифровые двойники, IoT, M2M



Проблемы управления в условиях цифровизации

- Сложность управления в условиях больших объемов данных, неопределённости, нестационарности и нелинейности процессов
- Усложняется обеспечение устойчивости
- Необходимость в высокоточных предиктивных моделях реального времени
- Санкционное давление и неопределенность в поставках сырья и комплектующих

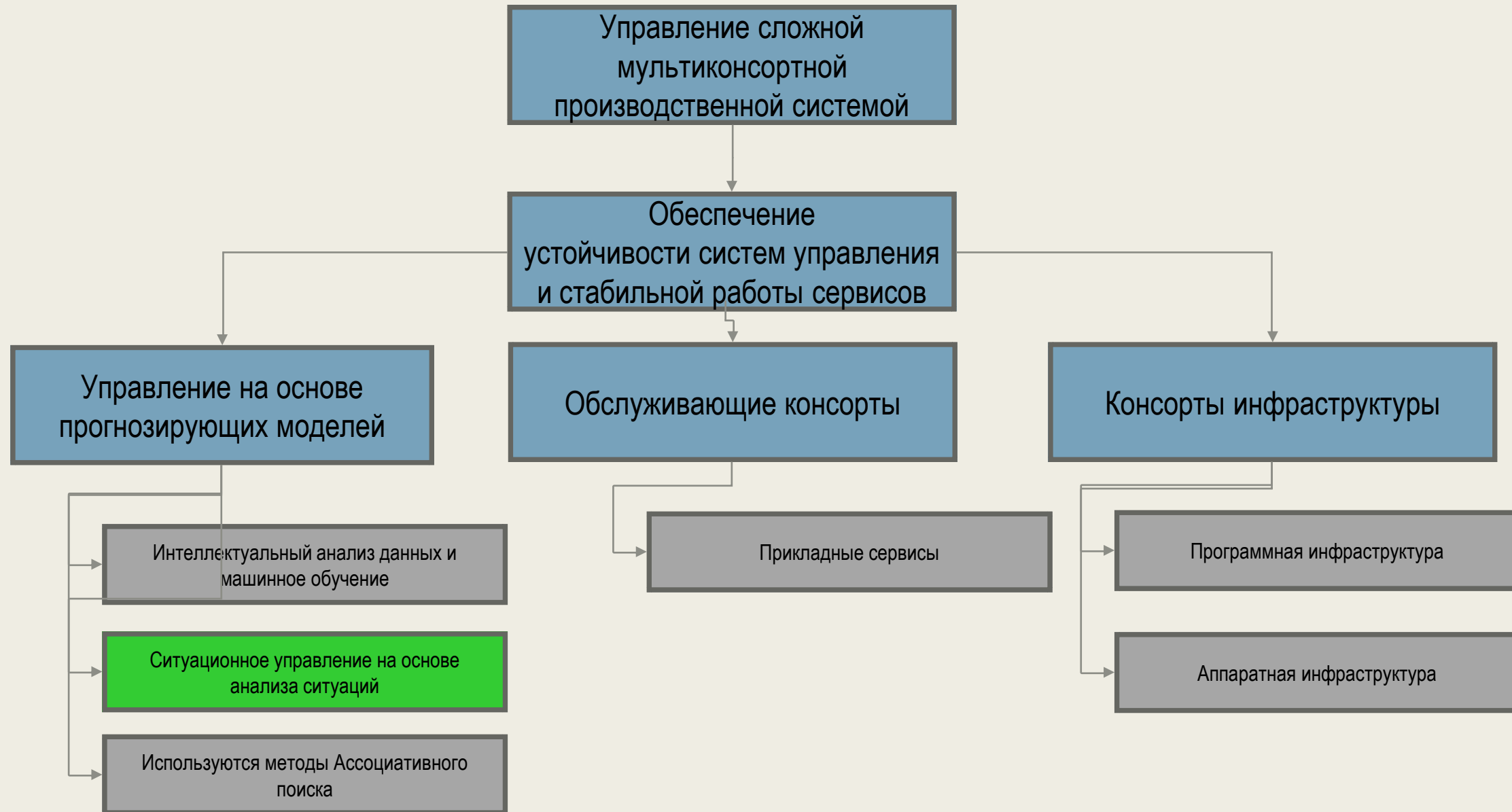
Интегрированные СУП могут быть интерпретированы как мультиагентные системы

- В литературе показаны условия устойчивости и синхронизации мультиагентных систем, достижения консенсуса
- Исследуются только интеллектуальные агенты (например некоторые автоматические и автоматизированные системы)
- Обеспечение устойчивости исследуется только для задач управления, не учитываются вопросы стабильного функционирования ПО и инфраструктуры
- Долгие и инфраструктурно-дорогие вычислительные операции

Концепция: АСУП как Цифровые мультиконсортные системы

- Цифровая экосистема представляет собой формализацию системы взаимодействующих элементов – цифровых консортов. Иногда в рамках определенного проекта консорты объединяются, образуя *цифровые консорции* (подсистемы ЦЭС).
- Консорты: Взаимодействие цифровых консортов (и/или консорций) направлено либо на совместное выполнение определенных задач (собственных или общих для системы), либо определенные консорты выполняют какую-нибудь задачу (или ее часть) для других консортов. **Это: подсистемы управления, сервисы ПО, инфраструктурные сервисы**
- Управление - на основе виртуальных цифровых предиктивных моделей, использующих индуктивные знания
- Индуктивные знания – закономерности, извлекаемые из данных путем интеллектуального анализа . Кластеризация.
- Метод идентификации – ассоциативный поиск – по сути - Smart МНК
- Интерпретация управления ЦЭС как ситуационного управления сложной системой:
Вектор состояния сложной системы, состоящий из консортов всех типов, может быть интерпретирован как вектор ситуации
 - *Применяя ассоциативные модели, основанные на знании динамики объекта в замкнутом контуре, мы автоматически анализируем текущую ситуацию и находим «похожие» ситуации «в прошлом» исследуемой системы*
 - *Алгоритмы управления в соответствующих инженерных (и не только) задачах обычно используют логико-лингвистические, нечеткие, нейро-нечеткие и другие подходы на основе ИИ (искусственного интеллекта), а не традиционные интегро-дифференциальные и конечно-разностные уравнения. В литературе также имеется множество примеров применения этого подхода.*
 - *Нормализация всех данных ситуации на отрезок [0,1].*
 - *Ситуация полностью определяется набором признаков, совокупность значений которых в момент времени k будем называть Цифровым портретом ситуации.*

Концепция построения системы управления как мультиконсортной системой управления производством



Подход к управлению ЦЭС, обеспечивающий ее устойчивое функционирование

Реализация стабильного функционирования системы управления ресурсами производства в ЦЭС - мультиконсортной системы может быть осуществлена на основе:

- устойчивости систем управления
- эффективной организации консорт-сервисного слоя и слоя вычислительной инфраструктуры

ЦЭС формализуется как система взаимодействующих цифровых консо́ртов:

$$DES = \{\langle C_1 \rangle \langle C_2 \rangle \dots \langle C_N \rangle\},$$

где C_i , $i = 1, \dots, N$ – все элементы (консо́рты) исследуемой ЦЭС. Среди этих консо́ртов – подсистемы, решающие определенные целевые задачи, а также – консорт-сервисы, решающие задачи обработки, хранения и визуализации данных для основных целевых консо́ртов (обслуживающие консо́рты), работающие поверх определенной вычислительной инфраструктуры.

Таким образом,

$$DES = \{\langle C_1^c, \dots, C_{N_1}^c \rangle \langle C_1^{cs}, \dots, C_{N_2}^{cs} \rangle \langle C_1^{inf}, \dots, C_{N_3}^{inf} \rangle\},$$

где: C_i^c , $i = 1, \dots, N_1$ – подсистемы ЦЭС, которые решают определенные целевые задачи управления;
 C_i^{cs} , $i = 1, \dots, N_2$ – консорт-сервисы, решающие обеспечивающие задачи по подготовке данных для использования в целевых консортах (обеспечивающие консо́рты);

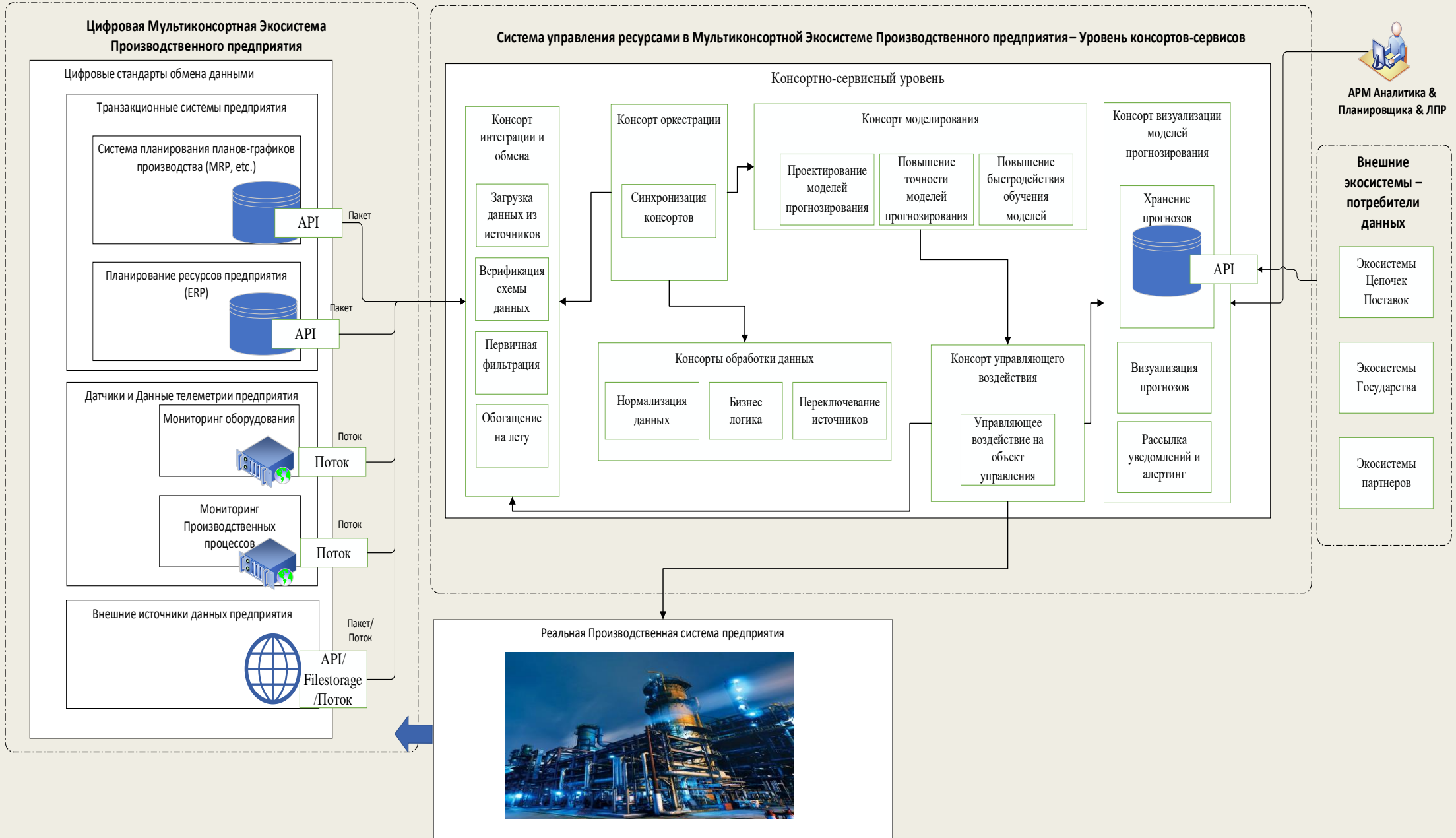
C_i^{inf} , $i = 1, \dots, N_3$ – консо́рты вычислительной инфраструктуры, на основе которых работает вся система управления (консо́рты инфраструктуры).

Научные результаты работы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- Сформулированы основные принципы построения архитектуры системы управления производственным процессом промышленного предприятия как Цифровой экосистемы на основе мультиконсортного подхода.
- Разработаны принципы формирования функциональной архитектуры консорт-сервисного слоя и описаны основные свойства и функции каждого слоя архитектуры ЦЭС предприятия.
- Сформулирован критерий устойчивости мультиконсортной системы управления, в которой учитываются: как консорт-сервисная устойчивость консортов – систем управления производственными процессами, стабильность работы сервисов и инфраструктурная стабильность.
- Внедрен прототип системы управления ресурсами производства с прогнозирующими моделями для цифровой платформы «KAMOTIVE» ПАО «КАМАЗ» на примере задачи прогнозирования серверных производственных мощностей.

Функциональная архитектура консорт-сервисного уровня системы управления ресурсами производства в ЦЭС предприятия



Основные публикации за 2021-2022г. – 12 публикаций, 3 – в процессе публикации

1. Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues // **Annual Reviews in Control**. 2021. 51. С. 56-64, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578820300766>.Q1, **WoS, SCOPUS**
2. Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С., Пятецкий В.Е., Елпашев Д.В. Digital Ecosystem Situational Control Based on a Predictive Model / **IFAC-PapersOnLine**. 54(1). Pp. 300-306. **WoS, SCOPUS**
3. Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. Agent-Based Architectural Models of Supply Chain Management in Digital Ecosystems / **Intelligent Systems and Applications - Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC)**, Proceedings. Cham: Springer, 2021. volume 1252. Pp. 115-127. **SCOPUS**
4. Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. CONTROL SYSTEMS ARCHITECTURE WITH A PREDICTIVE IDENTIFICATION MODEL IN DIGITAL ECOSYSTEMS / **Smart Innovation, Systems and Technologies**. Singapore: Springer, 2021. V.200. Pp. 439-449. **SCOPUS**
5. Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С. Digital Ecosystems Control Based on Predictive Real-Time Situational Models / **Advances in Intelligent Systems and Computing (Proceedings of the 2021 Future of Information and Communication Conference (FICC), Volume 1)**. Cham, Switzerland: Springer, 2021. V. 1363 . С. 605-623. **SCOPUS**
6. Бахтадзе Н.Н., Сулейкин А.С., Елпашев Д.В., Сабитов Р.А., Сабитов С., Смирнова Г.С., Kuchinskii M. Management Projects for Digital Ecosystems of Automotive Enterprises: Truck Sharing / **IFIP Advances in Information and Communication Technology**. Nantes, France: Springer, 2021. Volume 630. Pp. 563–571. **WoS, SCOPUS**
7. Alexander Suleykin, Natalya Bakhtadze, Denis Elpashev. Associative Rules-Driven Intelligent Production Schedule Control System for Digital Manufacturing Ecosystem. **MIM'2022 (in press)**. **WoS, SCOPUS (принято к публикации)**.
8. Dmitry Novikov, Natalya Bakhtadze, Denis Elpashev, Alexander Suleykin. Integrated Resource Management in the Digital Ecosystem of the Enterprise Based on Intelligent Consorts. **MIM'2022 (in press)**. **WoS, SCOPUS (принято к публикации)**.

Основные публикации за 2021-2022г. – 12 публикаций, 3 – в процессе публикации

9. Alexander Suleykin, Petr Panfilov. Designing Data-Intensive Application System for Production Plans Data Processing and Near Real-Time Analytics. CoDIT'2022 (in press). **WoS, SCOPUS (принято к публикации)**.
10. N. Bakhtadze, A. Cheresenko, D. Elpashev, A. Suleykin, A. Purto. Predictive associative models of processes and situations, **IFAC-PapersOnLine**, Volume 55, Issue 2, 2022, Pages 19-24, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.163>. **WoS, SCOPUS**
11. A. Suleykin, A. Bobkova, P. Panfilov and I. Chumakov, "Efficient Data Exchange Between Typical Data Lake and DWH Corporate Systems," 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECET52533.2021.9698468. **WoS, SCOPUS**
12. P. Panfilov, A. Suleykin, A. ElDarawany and D. Elpashev, "Open-Source Digital Infrastructure Capacity Prediction System for Production Company," 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2021, pp. 915-920, doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632166. **WoS, SCOPUS**
13. Peter Panfilov, Alexander Suleykin, and Ahmed ElDarawany. 2021. Digital Ecosystem-Based KPI-Driven Railway Communication Network Reporting System. In Proceedings of the 13th International Conference on Management of Digital EcoSystems (MEDES '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 163–166. DOI:<https://doi.org/10.1145/3444757.3485173>. **WoS, SCOPUS**
14. Suleykin, A[lexander]; Bobkova, A[nna]; Panfilov, P[eter] & Chumakov, I[lya] (2021). Comparing HDFS – Greenplum Data Loading Options, Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium, pp.0724-0731, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-33-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. **SCOPUS**
15. Panfilov P., Suleykin A. (2021) Chapter 8 Building Resilience into the Metadata-Based ETL Process Using Open Source Big Data Technologies. In: Roberts F.S., Sheremet I.A. (eds) Resilience in the Digital Age. Lecture Notes in Computer Science, vol 12660. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70370-7_8. **Q3, WoS, SCOPUS**

Спасибо за внимание!