

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: ЦИФРОВОЙ СУВЕРЕНИТЕТ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВЫЗОВЫ

Индекс УДК 004.89:621.311
Код ГРНТИ 50.43.31, 28.23.19
DOI: 10.22204/2410-4639-2026-129-01-16-24



**Л.В. МАССЕЛЬ,
А.Г. МАССЕЛЬ***

Методология научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики на основе ситуационного управления и цифровых двойников

В статье представлена разработанная методология научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики, основанная на синтезе концепции ситуационного управления Д.А. Поспелова и современных интеллектуальных технологий. Обоснована необходимость интеграции семантического моделирования (онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного), методов машинного обучения (глубоких нейронных сетей и генетических алгоритмов) и технологий цифровых двойников для решения задач стратегического планирования в условиях неопределённости. Предложена архитектура многоагентной интеллектуальной среды (МАИС), обеспечивающей взаимодействие цифровых двойников объектов энергетики и «умных» цифровых двойников (цифровых образов) на уровне систем и топливно-энергетического комплекса. Разработаны бионические модели выбора управляющих воздействий, сочетающие информационные методы, нейронные сети и генетические алгоритмы с явным и неявным представлением управляющих воздействий. Рассмотрены методы киберситуационной осведомлённости как синтеза исследований кибербезопасности и ситуационной осведомлённости. Приведены результаты апробации методологии на примерах создания прототипа цифрового двойника солнечной электростанции и реинжиниринга программного комплекса ИНТЭК-А как умного

* **Массель Людмила Васильевна** — доктор технических наук, заведующая отделом систем искусственного интеллекта в энергетике Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН).
E-mail: massel@isem.irk.ru

Массель Алексей Геннадьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела систем искусственного интеллекта в энергетике ИСЭМ СО РАН.
E-mail: amassel@isem.irk.ru

цифрового двойника топливно-энергетического комплекса. Методология позволяет повысить обоснованность стратегических решений за счёт интеграции качественного анализа на основе семантических моделей и количественного анализа с применением экономико-математических моделей в условиях учёта требований кибербезопасности и обеспечения устойчивости энергетических систем.

Ключевые слова: цифровая трансформация энергетики, ситуационное управление, семантическое моделирование, цифровой двойник, кибербезопасность, многоагентная интеллектуальная среда, стратегические решения, устойчивость энергетических систем, машинное обучение, генетические алгоритмы, киберситуационная осведомлённость, онтологический инжиниринг, бионические модели, умный цифровой двойник

Распространение концепций цифровой экономики и цифровой энергетики в Российской Федерации сопровождается рядом нерешённых проблем, среди которых выделяются когнитивные и управленческие сложности, научные и технологические ограничения, а также дефицит кадров [1]. Анализ Государственной программы «Цифровая экономика» и федерального проекта «Цифровая энергетика» показывает отсутствие в перечне рекомендуемых информационных технологий двух критически важных направлений: «Интеллектуальные технологии поддержки принятия стратегических решений по развитию цифровой энергетики» и «Технологии обеспечения кибербезопасности объектов цифровой энергетики» [2]. В условиях цифровизации энергетических систем информационно-коммуникационная подсистема становится сопоставимой по сложности и уязвимости с физической подсистемой, что повышает риски кибератак и требует новых подходов к обоснованию стратегических решений.

Концептуальные основы методологии

В основе предлагаемой методологии лежит концепция ситуационного управления, разработанная Д.А. Поспеловым в 1960–1980-х гг. [3]. Согласно этой концепции, выбор управляющих воздействий сводится к адекватной оценке состояния объекта и среды, отнесению текущей ситуации

к одному из типовых классов и выбору варианта управления из определённого набора альтернатив, приводящего к достижению целевой ситуации. В отличие от традиционного применения концепции к оперативному управлению авторы предложили её адаптацию к стратегическому управлению в энергетике [4].

Для реализации концепции ситуационного управления разработан комплекс методов семантического моделирования:

- онтологическое моделирование для управления знаниями и описания ситуаций;
- когнитивное моделирование для анализа влияний факторов и моделирования угроз;
- событийное моделирование на основе Joiner-сетей для прогнозирования развития экстремальных ситуаций;
- вероятностное моделирование с использованием байесовских сетей доверия для оценки рисков [5].

Эти методы активно используются при интеграции цифровых двойников и многоагентной интеллектуальной среды. Современные тренды цифровизации, в частности технологии цифровых двойников (ЦД), позволили модифицировать архитектуру интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Предложена модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды (МАИС), интегрирующая цифровые двойники объектов энергетики и «умные» цифровые

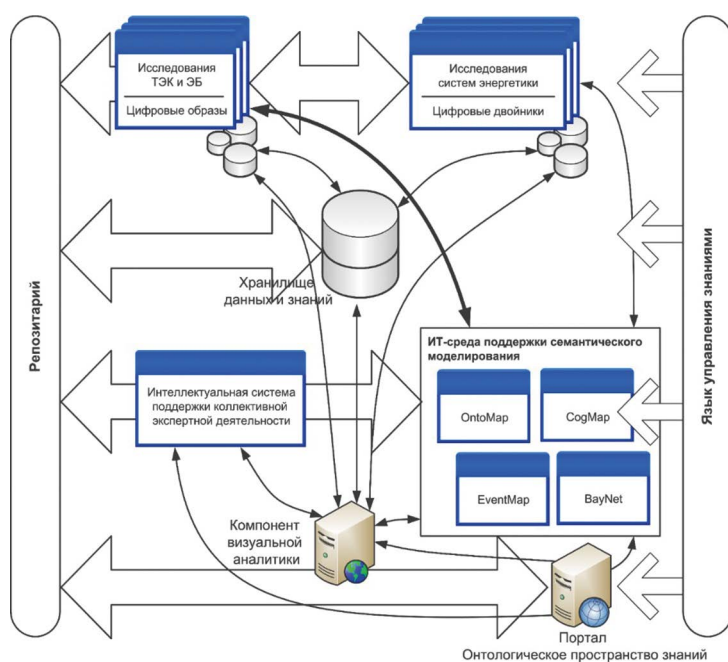


Рис. 1. Модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды с использованием цифровых двойников и цифровых образов

двойники (цифровые образы) на уровне систем и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) (рис. 1).

Под «умным» цифровым двойником (УЦД) предлагается понимать цифровой двойник, ядро которого – математические, имитационные, информационные и онтологические модели – дополнено интеллектуальными моделями, в первую очередь семантическими. Целесообразно использовать классические ЦД на уровне отдельных объектов (например подстанций), УЦД – на уровне систем энергетики, а на уровне ТЭК требуется разработка полноценных цифровых образов с элементами искусственного интеллекта [6].

Бионические модели выбора управляющих воздействий

Для повышения эффективности ситуационного управления разработаны бионические модели выбора управляющих воздействий, основанные на синтезе информационного метода обобщённого показателя (И), искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетических алгоритмов (ГА) [7]. Ключевой особенностью является новый принцип

представления данных в хромосоме генетического алгоритма.

При явном представлении управляющего воздействия хромосома строится из генов-векторов логических переменных, определяющих наличие или отсутствие конкретных управляющих воздействий. Информация о типе воздействия подаётся на вход нейронной сети одновременно с данными о состоянии объекта.

При неявном представлении каждый ген являет собой вектор весовых коэффициентов модели, описывающей эффект одного управляющего воздействия. Хромосома формируется из «банка» обученных моделей, что позволяет расширить функциональные возможности генетического алгоритма за счёт многомерного представления данных.

Для генерации данных в условиях недостатка измерений от датчиков реализованы генеративно-состязательные сети (GAN) и вариационные автоэнкодеры с использованием предварительно обученных моделей (Transfer Learning – Xception), что позволило успешно синтезировать данные для обучения нейросетевых моделей [8].

Киберситуационная осведомлённость энергетических объектов

В проекте развивалось новое для отечественной науки направление – киберситуационная осведомлённость (КСО), представляющее собой синтез исследований кибербезопасности и ситуационной осведомлённости [9]. Под КСО энергетических объектов понимается осведомлённость о состоянии киберсреды, включающая информацию о критических уязвимостях, киберугрозах и техногенных угрозах энергетической безопасности, вызванных кибератаками.

Разработан интеллектуальный программный комплекс (ИПК) ОКО (Оценка Киберситуационной Осведомлённости), включающий три компонента:

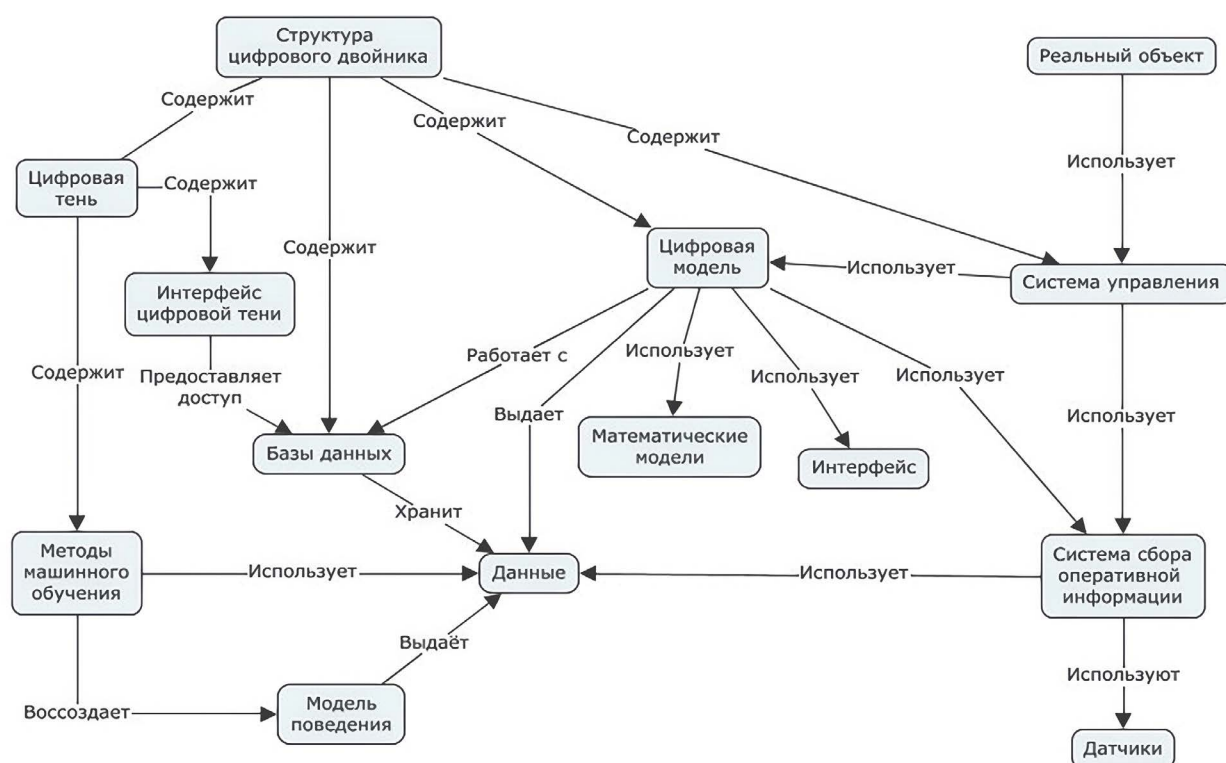


Рис. 2. Архитектура цифрового двойника солнечной электростанции

- экспертную систему «Cyber» для формирования векторов атак на критическую информационную инфраструктуру;
- компонент «ThreatNet» для моделирования сценариев нарушения кибербезопасности на основе байесовских сетей;
- компонент «RiskMap» для визуальной оценки рисков с использованием когнитивной графики [10].

Результаты апробации методологии

В рамках проекта реализованы научные прототипы ключевых компонентов МАИС:

- ♦ *Прототип цифрового двойника солнечной электростанции*, включающий онтологическую модель фотоэлектрической системы, вычислительное ядро и базу данных (получено свидетельство о регистрации № 2021681401 от 21.12.2021) (рис. 2);
- ♦ *Программный комплекс ИНТЭК-А* как умный цифровой двойник ТЭК с агентно-сервисной архитектурой (рис. 3), включающий семь специализированных аген-

тов: формирования сценариев, информационных моделей, мер, классификации угроз, вычислительный, взаимодействия с БД и семантического моделирования [11];

- ♦ *Интеллектуальный программный комплекс ОКО* для анализа киберситуационной осведомлённости, прошедший апробацию на примерах анализа угроз критической информационной инфраструктуры энергетики.

Проведены вычислительные эксперименты по оценке влияния угроз энергетической безопасности (например «Недостаток инвестиций») на надёжность энергоснабжения с использованием двухуровневой технологии: качественного анализа на основе когнитивных моделей и количественного анализа с применением экономико-математических моделей оптимизации развития ТЭК.

Заключение

Разработанная методология научного обоснования стратегических решений

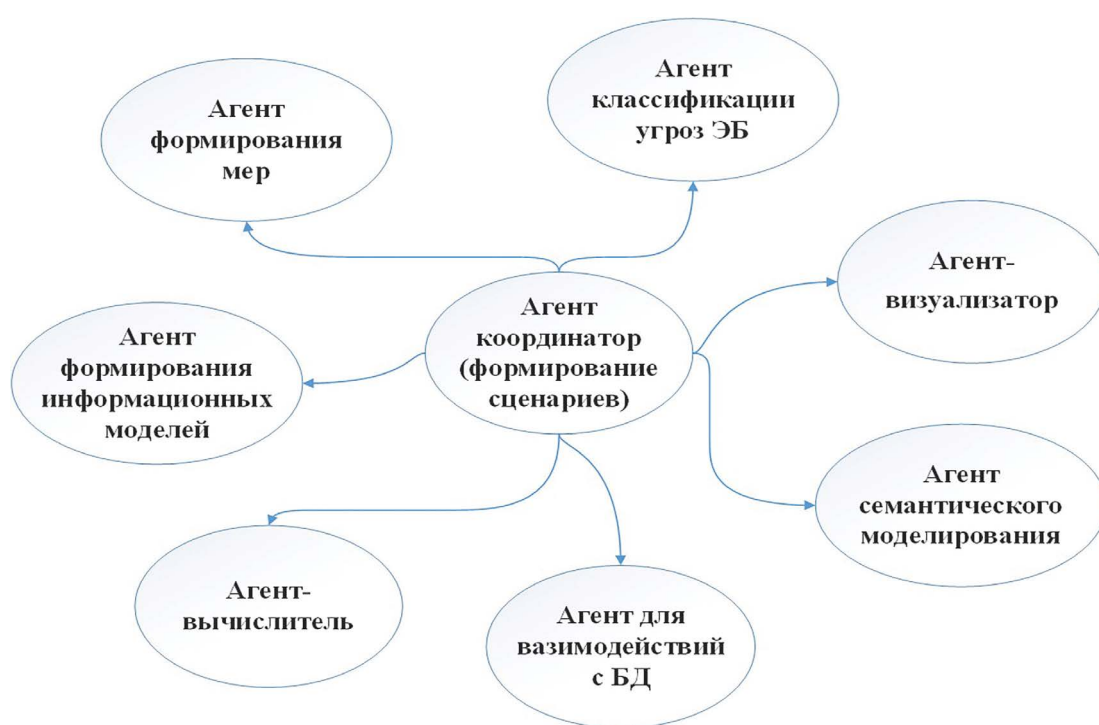


Рис. 3. Агентно-сервисная архитектура программного комплекса «ИНТЭК-А»

по цифровой трансформации энергетики обеспечивает интеграцию современных интеллектуальных технологий с концепцией ситуационного управления.

Ключевые результаты проекта:

1. Предложена модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды, интегрирующая цифровые двойники объектов и «умные» цифровые двойники систем энергетики.
2. Разработаны бионические модели выбора управляющих воздействий с новым принципом представления данных в генетических алгоритмах.
3. Сформирована методология киберситуационной осведомлённости как ин-

струмента повышения защищённости цифровой энергетики.

4. Созданы научные прототипы инструментальных средств (ЦД солнечной электростанции, ИНТЭК-А, ИПК ОКО), прошедшие апробацию на реальных задачах обоснования стратегических решений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием методов интеграции цифровых двойников в единую экосистему «Интернет энергии», с расширением применения методов машинного обучения для прогнозирования развития критических ситуаций и созданием технологий перехода от научных прототипов цифровых двойников к их промышленному внедрению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальная поддержка принятия решений по оценке влияния энергетики на геоэкологию с учётом качества жизни // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2019»: науч. изд.: в 2 т. Т. 1. Таганрог: Изд-во Ступина, 2019. С. 207–216.
2. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. 2017. Т. 7, № 1 (23). С. 66–76.

3. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
4. Пяткова Н.И., Массель Л.В., Массель А.Г. Методы ситуационного управления в исследованиях проблем энергетической безопасности // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 4. С. 156–163.
5. Массель Л.В., Массель А.Г. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // Материалы международной научно-технической конференции «OSTIS-2013». Минск: БГУИР, 2013. С. 247–250.
6. Массель Л.В. Построение цифровых двойников ветровой и солнечной электростанций на основе онтологического подхода / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Н.И. Шукин [и др.] // Автоматизация в промышленности. 2022. № 7. С. 28–32. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.04.
7. Use of semi-synthetic data for catheter segmentation improvement / V.V. Danilov, D.Yu. Kolpashchikov, O. M. Gerget [et al.] // Computerized Medical Imaging and Graphics. 2023. Vol. 106. P. 102188. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2023.102188.
8. Laptev V.V., Gerget O.M., Markova N.A. Generative Models Based on VAE and GAN for New Medical Data Synthesis // Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Cham: Springer, 2021. P. 217–226. DOI: 10.1007/978-3-030-63563-3_17.
9. Гаськова Д.А., Массель А.Г. Методы анализа киберситуационной осведомлённости об энергетических объектах // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 2 (27). С. 45–59.
10. Massel A.G., Gaskova D.A. Methods to analyze critical facilities in energy with regard to cyber threats // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures». 2018. P. 102–109.
11. Массель А.Г., Мамедов Т.Г., Пяткова Н.И. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 62–73. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.006.

Methodology for the Scientific Substantiation of Strategic Decisions on the Digital Transformation of the Energy Sector Based on Situational Management and Digital Twins

Liudmila Vasilievna Massel — Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (MESI SB RAS).

E-mail: massel@isem.irk.ru

Aleksei Gennadievich Massel — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (MESI SB RAS).

E-mail: amassel@isem.irk.ru

The article presents a developed methodology for scientific substantiation of strategic decisions on digital transformation of energy industry based on the synthesis of D.A. Pospelov's situational management concept and modern intelligent technologies. The necessity of integrating semantic modeling (ontological, cognitive, event-based and probabilistic), machine learning methods (deep neural networks and genetic algorithms) and digital twin technologies for solving strategic planning tasks under uncertainty is substantiated. The architecture of a multi-agent intelligent environment (MAIE) is proposed, ensuring interaction between digital twins of energy objects and "smart" digital twins (digital shadows) at the level of systems and fuel-energy complex. Bionic models for selecting control actions have been developed, combining information methods, neural networks and genetic algorithms with explicit and implicit representation of control actions.

Methods of cyber-situational awareness as a synthesis of cybersecurity and situational awareness research are considered. The results of methodology approbation are presented on the examples of creating a prototype digital twin of a solar power plant and reengineering of the INTEK-A software complex as a smart digital twin of the fuel-energy complex. The methodology allows increasing the validity of strategic decisions through integration of qualitative analysis based on semantic models and quantitative analysis using economic-mathematical models while taking into account cybersecurity requirements and ensuring the resilience of energy systems.

Keywords: digital transformation of energy industry, situational management, semantic modeling, digital twin, cybersecurity, multi-agent intelligent environment, strategic decisions, resilience of energy systems, machine learning, genetic algorithms, cyber-situational awareness, ontological engineering, bionic models, smart digital twin

REFERENCES

1. Massel L.V., Massel A.G. Intellekturnaya podderzhka prinyatiya resheniy po otsenke vliyaniya energetiki na geokologiyu s uchetom kachestva zhizni // Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellekturnye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2019»: nauch. izd. : v 2 t. T. 1. Taganrog: Izd-vo Stupina, 2019. S. 207–216 (in Russian).
2. Massel L.V., Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskoy inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh resheniy v energetike // Ontologiya proektirovaniya. 2017. T. 7, № 1 (23). S. 66–76 (in Russian).
3. Pospelov D.A. Situatsionnoye upravlenie. Teoriya i praktika. M.: Nauka, 1986. 288 s. (in Russian)
4. Pyatkova N.I., Massel L.V., Massel A.G. Metody situatsionnogo upravleniya v issledovaniyakh problem energeticheskoy bezopasnosti // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika. 2016. № 4. S. 156–163 (in Russian).
5. Massel L.V., Massel A.G. Semanticheskie tekhnologii na osnove integratsii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytiynogo modelirovaniya // Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «OSTIS-2013». Minsk: BGUIR, 2013. S. 247–250 (in Russian).
6. Massel L.V. Postroyeniye tsifrovyykh dvoynikov vetrovoy i solnechnoy elektrostantsiy na osnove ontologicheskogo podkhoda / L.V. Massel, A.G. Massel, N.I. Shchukin [et al.] // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2022. № 7. S. 28–32. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.04 (in Russian)
7. Use of semi-synthetic data for catheter segmentation improvement / V.V. Danilov, D.Yu. Kolpashchikov, O.M. Gerget [et al.] // Computerized Medical Imaging and Graphics. 2023. Vol. 106. P. 102188. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2023.102188.
8. Laptev V.V., Gerget O.M., Markova N.A. Generative Models Based on VAE and GAN for New Medical Data Synthesis // Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Cham: Springer, 2021. P. 217–226. DOI: 10.1007/978-3-030-63563-3_17.
9. Gaskova D.A., Massel A.G. Metody analiza kibersituatsionnoy osvedomlennosti ob energeticheskikh obektakh // Voprosy kiberbezopasnosti. 2021. № 2 (27). S. 45–59 (in Russian).
10. Massel A.G., Gaskova D.A. Methods to analyze critical facilities in energy with regard to cyber threats // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures». 2018. P. 102–109.
11. Massel A.G., Mamedov T.G., Pyatkova N.I. Tekhnologiya vychislitel'nogo eksperimenta v issledovaniyakh raboty energeticheskikh otrasley pri realizatsii ugroz energeticheskoy bezopasnosti // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2021. № 3 (23). S. 62–73. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.006 (in Russian).

Images

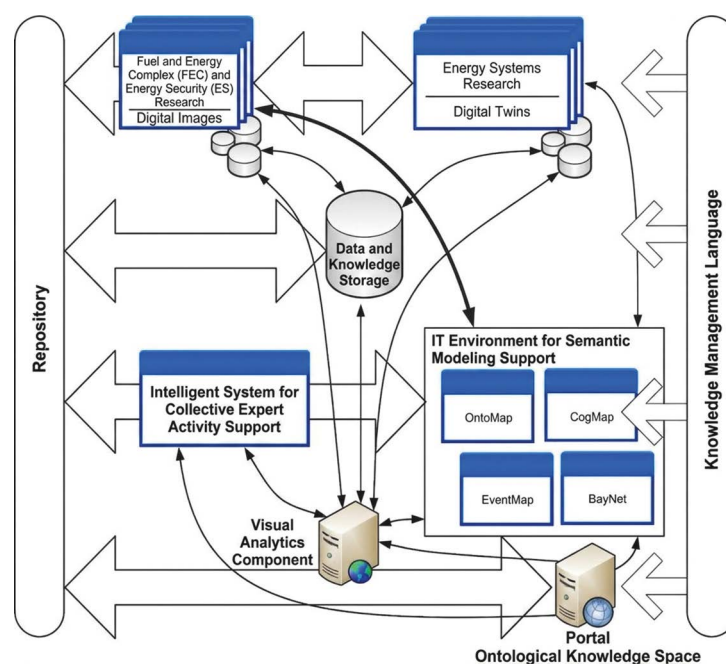


Fig. 1. Modified architecture of a multi-agent intelligent environment utilizing digital twins and digital images

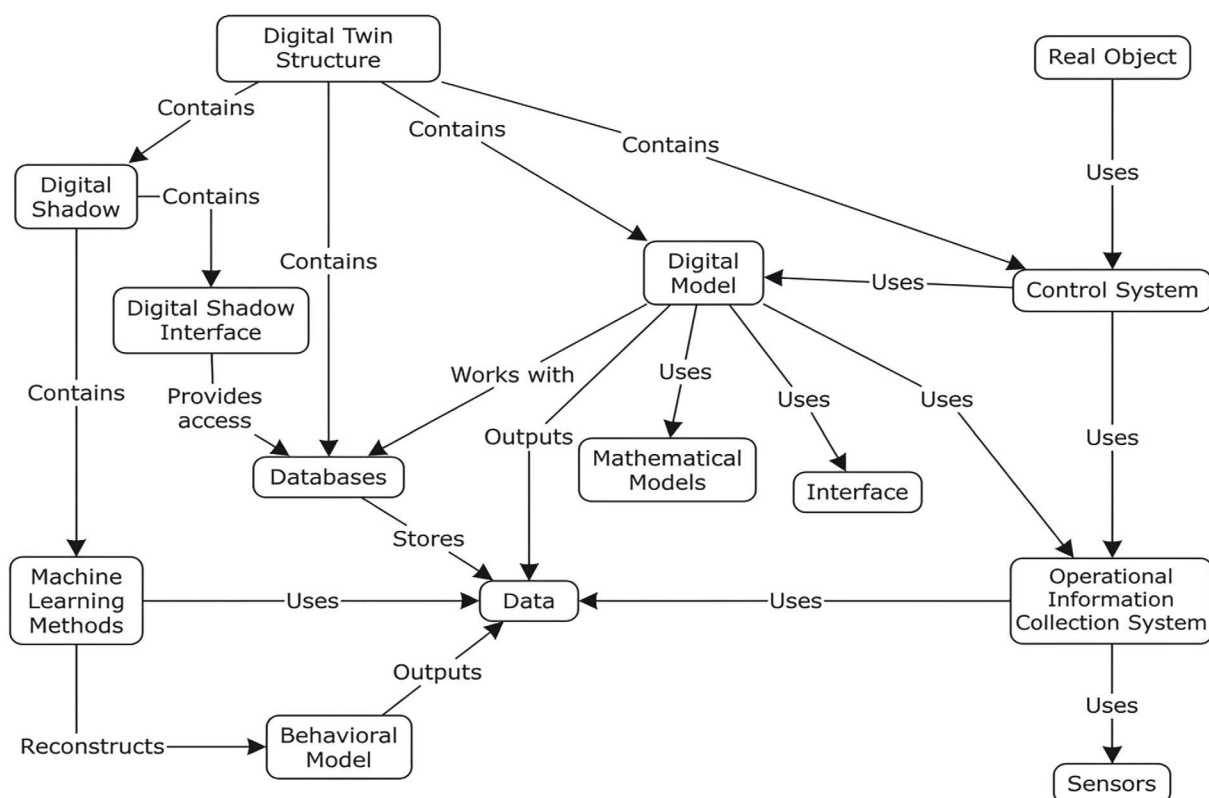


Fig. 2. Architecture of the digital twin of a solar power plant

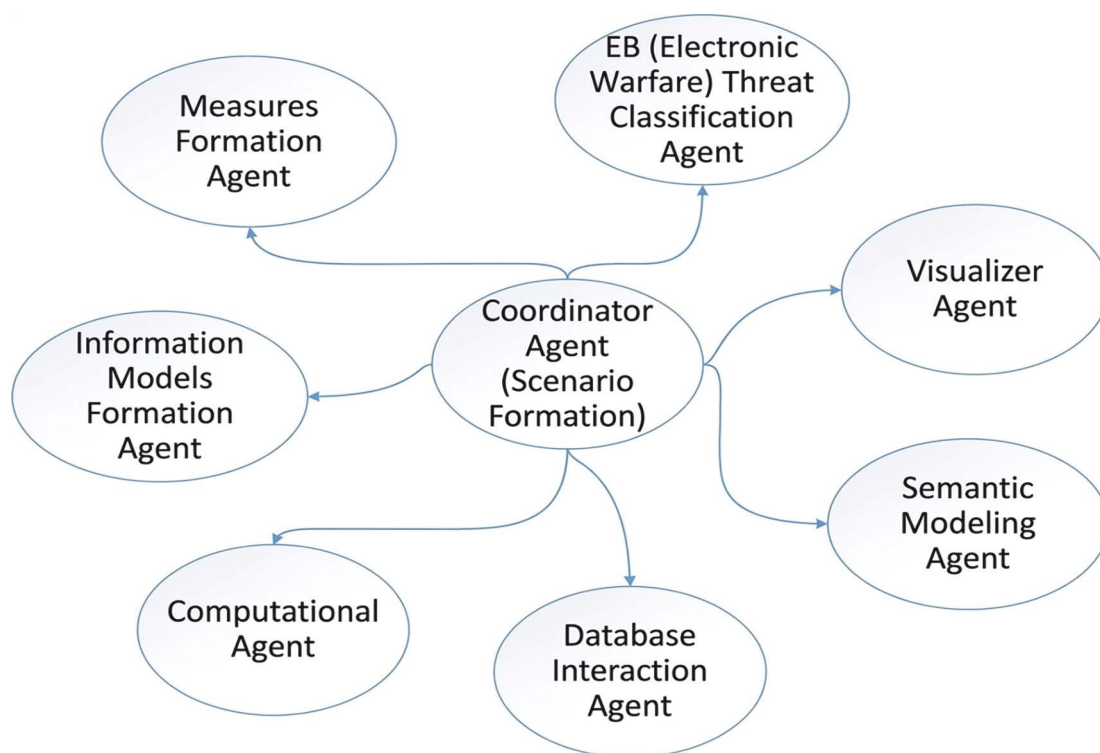


Fig. 3. Agent-Service Architecture of the «INTEK-A» Software Complex