

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ: АРХИТЕКТУРА, МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Сергиевич А.А., Шабанович Р.А.

*Академия управления при Президенте Республики Беларусь,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Шабанович Р.А.

Аннотация. Статья посвящена архитектуре и методам построения интеллектуальных киберфизических систем и цифровых двойников. Рассматриваются вопросы моделирования, применения искусственного интеллекта и обработки данных в реальном времени, а также перспективы их промышленного использования.

Ключевые слова: киберфизические системы, цифровой двойник, машинное обучение, предиктивная аналитика, обработка данных, индустрия 4.0.

Введение. Современный этап технологического развития характеризуется интенсивной цифровой трансформацией промышленности, транспорта и социальной инфраструктуры. Формируется новая технологическая среда, в которой физические процессы тесно интегрируются с вычислительными и коммуникационными технологиями. В таких условиях данные становятся стратегическим ресурсом, а их интеллектуальная обработка – ключевым инструментом принятия управленческих решений.

Особую роль в данных процессах играют киберфизические системы и цифровые двойники, обеспечивающие непрерывную связь между реальными объектами и их виртуальными представлениями. Развитие этих технологий напрямую связано с концепциями Индустрии 4.0, промышленного интернета вещей и интеллектуального производства.

Рост объёмов сенсорных данных, усложнение инженерных систем и необходимость повышения эффективности эксплуатации оборудования требуют внедрения интеллектуальных методов анализа и прогнозирования. Использование облачных и периферийных вычислений позволяет реализовывать обработку данных в реальном времени, обеспечивая адаптивность и устойчивость управления.

Целью работы является систематизация архитектурных моделей, методов моделирования и интеллектуальных алгоритмов, применяемых при создании киберфизических систем и цифровых двойников.

Основная часть. Киберфизическая система представляет собой интегрированную совокупность физических объектов, вычислительных компонентов и коммуникационной инфраструктуры, функционирующих в замкнутом контуре обратной связи. Основной особенностью таких систем является способность осуществлять мониторинг, анализ и управление физическими процессами в режиме реального времени.

В отличие от традиционных автоматизированных систем управления, киберфизические системы обладают возможностями адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации, автономного принятия решений и самообучения на основе накопленных данных.

К ключевым свойствам КФС относятся распределённость компонентов, модульность архитектуры, масштабируемость, высокая степень автоматизации и интеграция цифровых моделей с физическими процессами.

Архитектурная модель киберфизических систем. Архитектура КФС является многоуровневой. Физический уровень включает датчики и исполнительные механизмы, обеспечивающие сбор параметров среды. Контроллерный уровень реализует локальное управление технологическими процессами. Сетевой уровень отвечает за передачу данных посредством промышленных протоколов связи. Облачный уровень обеспечивает хранение

информации и выполнение аналитических вычислений. Интеллектуальный уровень реализует алгоритмы анализа данных и поддержки принятия решений.

Важной особенностью архитектуры является наличие сквозных потоков данных, объединяющих все уровни системы. Предварительная обработка информации на периферийных устройствах снижает нагрузку на центральные вычислительные ресурсы и уменьшает задержки передачи данных.

Применение edge- и fog-вычислений позволяет переносить аналитические функции ближе к источникам данных, что повышает устойчивость функционирования распределённых систем.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную динамическую модель физического объекта, синхронизированную с реальным прототипом на протяжении всего жизненного цикла. Он обеспечивает непрерывное обновление состояния модели на основе поступающих данных.

Выделяют цифровые двойники компонентов, оборудования, производственных систем и инфраструктурных объектов. Их применение позволяет осуществлять мониторинг состояния, прогнозирование отказов и оптимизацию режимов эксплуатации.

Этапы разработки цифрового двойника. Создание цифрового двойника включает разработку математической модели, интеграцию сенсорных данных, построение алгоритмов анализа, валидацию модели и внедрение в контур управления.

Эффективность цифрового двойника определяется точностью синхронизации с физическим объектом. Для повышения адекватности применяются гибридные подходы, сочетающие физико-математическое моделирование и методы машинного обучения.

Интеллектуализация киберфизических систем основана на применении методов машинного обучения, включая регрессионные модели, алгоритмы классификации, нейронные сети, кластеризацию и методы обнаружения аномалий. Эти подходы позволяют выявлять закономерности функционирования технических систем.

Предиктивная аналитика. Предиктивная аналитика базируется на анализе временных рядов и применяется для прогнозирования технического состояния оборудования. Это позволяет перейти от планового обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, снижая эксплуатационные затраты и предотвращая аварии.

Обработка потоковых данных. Для обработки потоковых данных требуется минимальная латентность, масштабируемость вычислений и устойчивость к сбоям. Используются распределённые платформы потоковой обработки, обеспечивающие непрерывный анализ информации.

Особое значение приобретают методы глубокого обучения, позволяющие анализировать нелинейные зависимости. Использование рекуррентных моделей повышает точность прогнозирования и раннего обнаружения отклонений.

Интеграция интеллектуальных алгоритмов в контуры управления формирует адаптивные системы, способные автоматически корректировать режимы работы.

Киберфизические системы применяются в промышленности, энергетике, транспортной отрасли и медицине. Они используются для моделирования технологических процессов, оптимизации энергопотребления, мониторинга состояния оборудования и интеллектуального управления сложными объектами.

Информационная безопасность. Интеграция цифровых и физических компонентов усиливает требования к защите информации и устойчивости систем. Применяются криптографические методы, сегментация сетевой инфраструктуры и системы обнаружения аномалий.

Научные проблемы и перспективы развития. Основные научные задачи связаны с повышением точности моделей, снижением вычислительной сложности алгоритмов и стандартизацией обмена данными.

Заключение. Интеллектуальные киберфизические системы и цифровые двойники формируют технологическую основу цифровой экономики и промышленности нового

поколения. Их развитие требует междисциплинарной интеграции методов моделирования, анализа данных и искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Lee E.A. *Cyber-Physical Systems: Design Challenges*.
2. Tao F., Zhang M. *Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm*.
3. Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.
4. Siemens AG. *Industrial Digitalization Concepts*.
5. IBM Corporation. *Digital Twin Solutions Overview*.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

**INTELLIGENT CYBER-PHYSICAL SYSTEMS AND DIGITAL TWINS:
ARCHITECTURE, METHODS AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

Serhiyevich A.A., Shabanovich. R.A.

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk

Shabanovich. R.A.

Annotation. The article discusses the architecture and methods for building intelligent cyber-physical systems and digital twins. Issues of modeling, artificial intelligence application, and real-time data processing are considered, along with prospects for industrial implementation.

Keywords: cyber-physical systems, digital twin, machine learning, predictive analytics, data processing, Industry 4.0.