

АКСИОМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНЫХ АДАПТИВНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Шилин Л. Ю., Навроцкий А. А., Евдокимов В. Г.
Кафедра информационных технологий автоматизированных систем,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь
E-mail: {dekfitu, navrotsky}@bsuir.by, vigandvdk@gmail.com

Предлагается фундаментальный теоретико-методологический базис для исследования и проектирования сложных адаптивных экосистем, основанный на аксиоматическом подходе. Разработанная модель позволяет определить принципиальные закономерности эволюционного развития многоуровневых структур и устанавливает границы их автономной трансформации в контексте современных технологических экосистем.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях стремительного технологического развития особую актуальность приобретает проблематика разработки и интеграции сложных систем, требующая комплексного научного подхода к их исследованию и формализации. Принципиально важным становится понимание таких экосистем как самоорганизующихся структур, где взаимодействие компонентов порождает новые системные свойства, не сводимые к сумме характеристик отдельных элементов [1]. Это требует пересмотра традиционных подходов к проектированию, где система рассматривается как механистическая совокупность частей. Многогранность данной задачи обусловлена не только технической сложностью реализации, но и необходимостью учета множества взаимосвязанных факторов, влияющих на эффективность функционирования сложных адаптивных интеллектуальных экосистем [2].

Основная цель данного исследования заключалась в разработке методологического подхода к систематизации и формализации процессов создания и интеграции сложных систем с использованием аксиоматического моделирования. Данный подход позволяет не только структурировать существующие проблемы разработки и внедрения, но создать теоретический базис для их эффективного решения.

I. КЛЮЧЕВЫЕ ВЫЗОВЫ И СИСТЕМНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

В результате анализа современного состояния развития промышленных экосистем выявлен комплекс взаимосвязанных проблем, требующих системного решения. Существующие подходы к интеграции сложных систем демонстрируют ряд критических ограничений, препятствующих эффективному развитию киберфизических и интеллектуальных экосистем в контексте технологий Индустрии 4.0 и 5.0:

1. Технологические ограничения

Ключевой проблемой является отсутствие унифицированных и обратно совместимых

протоколов взаимодействия между гетерогенными компонентами различных производителей, что существенно затрудняет процесс системной интеграции [1]. Формализация данной проблемы может быть представлена как:

$$C_{int} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} P_{ij},$$

где:

- C_{int} – комплексный показатель сложности интеграции,
- P_{ij} – параметры совместимости протоколов,
- α_{ij} – весовые коэффициенты значимости,
- n, m – количество систем и протоколов соответственно.

2. Концептуальные вызовы

Отсутствие единой методологии проектирования сквозных процессов создает существенные барьеры при построении целостных экосистем. Проблема усугубляется несогласованностью моделей данных и бизнес-процессов между различными компонентами, что может быть описано следующим образом:

$$E_{sys} = f(M_d, P_b, I_c),$$

где:

- E_{sys} – эффективность экосистемы,
- M_d – модели данных,
- P_b – бизнес-процессы,
- I_c – информационные связи.

3. Практические и управленческие аспекты

В ходе комплексного анализа существующих подходов к управлению интегрированными интеллектуальными и киберфизическими системами были выявлены критические системные ограничения и методологические барьеры в области управления сложными многокомпонентными экосистемами, которые существенно снижают эффективность их функционирования и требуют раз-

работки новых концептуальных решений. К основным ограничениям относятся:

- сложность координации автономных подсистем;
- отсутствие механизмов разрешения конфликтов;
- проблемы оптимального распределения ресурсов;
- необходимость баланса между автономностью и централизацией.

II. АКСИОМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На основе выявленных критических ограничений в области управления интегрированными интеллектуальными и киберфизическими системами предлагается рассмотреть концепцию аксиоматической модели, формализующей принципы эффективного взаимодействия компонентов гетерогенных экосистем. Аксиоматическая модель сложных экосистем базируется на следующих основополагающих положениях:

1. Базовые системные аксиомы (определяющие фундаментальные свойства):
 - АТИС – Аксиома топологической инвариантности систем: Определяет неизменные базовые принципы системы;
 - АСГР – Аксиома системной гомеостетики: Обеспечивает устойчивость экосистемы;
 - АМСБ – Аксиома минимального системного базиса: Определяет критический минимум ресурсов для обеспечения базовой работоспособности;
 - АЭСО – Аксиома энтропийной самоорганизации: Оптимизация распределения ресурсов и ресурсный баланс.
2. Аксиомы адаптивности:
 - АМАС – Аксиома морфоадаптивной самоорганизации: Обеспечение гибкости реагирования и координация процессов адаптации;
 - ААСР – Аксиома автономной системной регуляции: Обеспечение локальной автономности и поддержание распределенного принятия решений;
 - АСЭС – Аксиома системной эмерджентности и синергии: Создание синергетических эффектов и интеграция локальных инноваций.
3. Эволюционные аксиомы:
 - АСБР – Аксиома самоорганизующейся бифуркации и развития: Контроль внедрения изменений и управление рисками инноваций;
 - АДСБ – Аксиома динамического системного баланса: Обеспечение баланса

развития и стабильности, координация инновационных процессов;

- АКСР – Аксиома когнитивной самореференции: Обеспечение накопления опыта, обеспечение самосовершенствования.
4. Управляющие аксиомы:
 - АПСМ – Аксиома предиктивной системной модификации: Обеспечение прогнозирования изменений, координация планирования развития;
 - АДСФ – Аксиома детерминированной системной функциональности: Обеспечение предсказуемости функционирования, обеспечение надежности взаимодействия.
 5. Стратегические аксиомы:
 - АУРС – Аксиома устойчивого развития систем: Обеспечение долгосрочного развития, поддержание системной устойчивости;
 - АТСС – Аксиома темпоральной системной синхронизации: Координация временных параметров, согласование целей развития;
 - АПВС – Аксиома полиморфной вариативности систем: Обеспечение системного разнообразия, обеспечение множественности путей развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная аксиоматическая модель представляет собой фундаментальный инструментарий для создания сложных адаптивных интеллектуальных экосистем нового поколения. Пятнадцать взаимосвязанных аксиом, организованных в функциональные группы, формируют теоретическую основу для интеграции искусственного интеллекта, цифровых двойников и систем распределенного принятия решений в единую экосистему. Предложенная модель обеспечивает комплексный подход к управлению процессами цифровой трансформации и развитию интеллектуальных экосистем, что способствует формированию адаптивных и устойчивых социо-технических систем, где технологии служат инструментом повышения качества жизни и благополучия человека в рамках устойчивого развития общества будущего.

III. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longo, F., Nicoletti, L., Padovano, A. Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context // *Computers & Industrial Engineering*. – Elsevier, 2017. – Vol. 113. – P. 144–159.
2. Ustundag, A., Cevikcan, E. *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* // Springer Series in Advanced Manufacturing. – Springer International Publishing, 2018. – 1st ed. – 286 p.