УДК 656.2.07:004.94

Н. М. ЛУГАНЧЕНКО, О. Н. ЧИСЛОВ
Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону
luganchenko.n@yandex.ru, o_chislov@mail.ru

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО АКСИОМАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УЗЛОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассматривается дальнейшее развитие метода цифрового аксиоматного моделирования работы мультимодальных транспортных узлов, основанного на формализации фундаментальных внутрисистемных правил и ограничений. Представлена систематизация методов цифрового аксиоматного моделирования транспортных процессов на основе структурно-логических схем, интегрирующих объекты моделирования с библиотекой алгоритмов управления через единую систему аксиомат. Данный подход позволяет перейти от фрагментарного имитационного объектного моделирования к целостному системному, верифицируемому проектированию и оптимизации транспортных процессов, что является ключевым этапом в создании цифрового двойника высокого уровня структурной архитектуры сложных транспортных систем.

Современное развитие узловых транспортных систем характеризуется переходом к созданию интегрированных мультимодальных транспортных узлов (МТУ), выступающих ключевыми элементами глобальных логистических цепей доставки грузов и пассажиров. Повышение эффективности МТУ, объединяющих железнодорожный, автомобильный, водный и иные виды транспорта, является одной из приоритетных задач перспективного развития транспортной системы страны. Однако их сложность, высокая степень взаимовлияния внутренних процессов, часто сопровождающихся возникновением транспортных конфликтов различной природы (занятие ресурса транспортных потоков, перегрузочных мощностей, складских площадей и т. п.) создают дополнительные условия, которые необходимо учитывать при их проектировании и управлении.

В настоящее время для моделирования транспортных процессов широко применяются имитационные, системотехнические, агентные, статистические и другие модели. Несмотря на свою практическую ценность, многие подходы носят описательный, частный характер и не выявляют фундаментальные причинно-следственные связи в системе. В связи с этим возникает проблема систематизации методов моделирования на основе единого универсального аппарата, обеспечивающего непротиворечивость, верифицируемость и точность получаемых результатов.

Систематизация методов моделирования представляет собой упорядочивание их в единую иерархическую структуру, основанную на строгих принципах с выделением трех взаимосвязанных уровней:

− методологического, на котором определяется базовый принцип моделирования, т. е. переход от описательных моделей к аксиоматическим. Это основа, задающая принципы организации ко всем элементам системы: каждый процесс, объект и алгоритм должен быть формализован через призму инвариантных правил – аксиомат, обеспечивающих целостность и непротиворечивость модели, делая ее не набором разрозненных сценариев, а единой структурой, подчиняющейся детерминированным законам;

− структурного (таблица 1), предлагающего иерархическую схему организации объектов и процессов моделирования в логическую цепочку, начиная от постановки системной цели (блок А) через декомпозицию на функциональные объекты (блоки Б, В) к формальному аппарату (блок Г) и реализующим его алгоритмам (блок Д). Эта структура устраняет фрагментарность, обеспечивая сквозное моделирование, при котором изменение на одном уровне автоматически проверяется на согласованность с другими через систему аксиомат;

− алгоритмического, проявляющегося в классификации алгоритмов управления (блок Д) по их функциональному назначению и, что важно, по тем аксиомам, которые они реализуют. Связь «аксиомата – алгоритм» является ядром предлагаемой систематизации, превращая библиотеку методов из набора инструментов в детерминированную систему, где каждый алгоритм отвечает за соблюдение определенного множества вариаций сценариев исполнения транспортной работы.

Таблица 1 – **Уровни архитектуры аксиомат транспортных процессов**

Название уровня	Характеристика	Блоки уровня
Уровень 1 – Системообразующий	Целевой объект моделирования, задающий общую функцию − интеграцию видов транспорта	Блок А: «Интегрированный мультимодальный транспортный узел (МТУ)»
Уровень 2 – Функциональные объекты (ядро моделирования)	Ключевые подсистемы МТУ, основные объекты для аксиоматного моделирования	Блок Б: «Железнодорожная инфраструктура (транспортный объект с конфликтами 1−3 родов)»
		Блок В: «Перегрузочный терминал (Порт)»
Уровень 3 – Управляющий и алгоритмический слой	Формальные правила и вычислительные методы, обеспечивающие функционирование системы	Блок Г: «Система аксиом и ограничений»
		Блок Д: «Библиотека алгоритмов транспортной работы»
Уровень 4 – Аналитический слой	Оценка адекватности и эффективности модели	Блок Е: «Обработка результатов и верификации модели»

Таким образом, аксиоматы выступают не просто как один из элементов системы, а как основа иерархии, обеспечивая их взаимосвязь, верифицируемость и детерминированность. Это позволяет говорить не просто о комплексе моделей, а о единой аксиоматической системе, пригодной для создания эффективно функционирующих цифровых двойников МТУ.

Систематизация методов цифрового аксиоматного моделирования транспортно-технологических процессов связана с взаимодействием базовых (АМТТП-Б) и модернизированных (АМТТП-М) моделей. Совокупность аксиомат, определяющих массив транспортных задач, поставленных перед объектом управления, представляет собой АМТТП-М. Модели АМТТП, не прошедшие обработку средствами теории нечетких множеств, рекуррентных нейронных сетей, теории активных систем, приняты базовыми АМТТП-Б [1]. В качестве входных переменных модели АМТТП

$$R(t) = \{R_{\text{пар}}, R_{\text{мсс}}, U\ (R_{\text{АМТТП}})_V^U, R_t\}$$

принимаются количественные и качественные параметры транспортной системы $R_{\text{пар}}$; параметры блоков модельной схемы транспортного объекта $R_{\text{мсс}}$; параметры последовательности объединения вариантов процедур организации транспортной работы – $U\ (R_{\text{АМТТП}})_V^U$, где U – процедура воздействия на последовательность выбора АМТТП, V – процедура вывода результатов воздействия на последовательность выбора АМТТП; временные параметры вариантов обработки транспортных средств в системе – R_t. Модель выходных параметров АМТТП имеет вид

$$H(t) = \{H_{\text{пар}}, H_{\text{мсс}}, U\ (H_{\text{АМТТП}})_V^W, H_t\},$$

где W – процедура графологической развертки рекурентной нейронной сети (РНС) взаимодействия аксиомат транспортных процессов и их выбора в зависимости от условий эксплуатации.

Важно отметить, что РНС должна учитывать предыдущие параметры наблюдения, т. е. работать с последовательностью событий транспортных объектов. Известно, что новый временной параметр аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов $(\text{АСТТП})^{t+1}$ по новой модели АМТТП-М зависит от нормативного (эталонного) значения аксиомат $(\text{АСТТП})^t$ и прошлых значений аксиомат $(\text{АСТТП})^{t-1}$ по варианту уже выполненной работы – АМТТП-Б.

Эти изменения возможно учитывать в моделях управления согласно архитектуре РНС, состоящей из трех слоев параметров времен моделей АМТТП, включающих набор значений аксиомат АСТТП: 1 – входной слой X (базовая модель АМТТП-Б), 2 – скрытый слой Н (нормативные/эталонные значения набора параметров АСТТП по возможным вариантам транспортной работы); 3 – выходной слой Y (модифицированная модель АМТТП-М с учетом новых условий управления транспортной работой и новых времен АСТТП). При этом веса АСТТП и временное смещение между входным и скрытым слоями обозна-

чаются как $W(АСТТП)_{XH}$ и $b(АСТТП)_H$; веса и смещение между скрытым и выходным (модифицированным /прогнозируемым) слоем – $W(АСТТП)_{HY}$ и $b(АСТТП)_Y$. В архитектуру РНС вводится набор весов установленных (эталонных) параметров времен аксиомат $W(АСТТП)_{HH}$, который позволит учитывать значения предыдущих времен АСТТП при прогнозировании очередного временного значения параметра транспортной работы по варианту управления [2, 3].

На рисунке 1 представлена структурно-логическая схема, представляющая собой иерархическую модель, реализующая последовательность действий от абстрактного, системного уровня к конкретным алгоритмам управления и анализа. При этом демонстрируются формальные аксиомы и алгоритмы, которые управляют процессами транспортной системы, включающей четыре основные иерархические уровня (рисунок 1).

Блок А является центральным и интегрирующим элементом всей схемы. Данный блок задает целевую функцию системы по обеспечению беспрепятственной интеграции видов транспорта и определяет ее границы, объединяя ключевые компоненты: железнодорожный транспорт, водный транспорт, автомобильный транспорт, пути сообщения, инфраструктуру, подвижной состав, портовые устройства, терминалы, структуры управления и т. п.

Блок Б включает грузовые станции, припортовые станции, районные парки и др., их путевое развитие. Ключевыми аспектами моделирования являются формализация и разрешение системных транспортных конфликтов управления (исключение занятия единого путевого ресурса, пересечений маршрутов движения, нерационального использования пропускных и перерабатывающих способностей и т. п.).

Блок В включает погрузочно-выгрузочные устройства: железнодорожные и автомобильные рампы, причалы, тыловые склады, складские площадки, парк погрузочно-разгрузочных машин (ПРМ) и др. Его главная задача – минимизация времени оборота подвижного состава и использования погрузочно-выгрузочных устройств.

Блок Г представляет собой формальный аппарат метода, обеспечивающий единую аксиоматичность транспортно-технологических процессов.

Блок Д агрегирует конкретные вычислительные методы, управляемые определенными аксиомами блока Г. Алгоритмы сгруппированы по функциональному признаку:

Группа 1: алгоритмы управления движением (оптимизация расписания, расчет интервалов, разрешение конфликтов на плане-графике).

Группа 2: алгоритмы грузовой и терминальной работы (оптимизация плана грузовых операций, работы ПРМ, диспетчеризация техники).

Группа 3: алгоритмы планирования ресурсов (распределение локомотивов и бригад, управление парком подвижного состава видов транспорта).

Группа 4: алгоритмы сценарного и стратегического планирования (имитационное моделирование «что-если» для оценки устойчивости системы к внешним возмущениям, долгосрочный прогноз развития мощностей, автоматизированное разрешение транспортных конфликтов, выходящих за рамки оперативного управления).



Рисунок 1 – Структурно-логическая схема взаимосвязей аксиомат транспортных процессов [2]

Преимуществом предложенной архитектуры взаимосвязей аксиомат транспортных процессов является то, что АМТТП выступают в роли инвариантов, которые не должны нарушаться в процессе вычислений, и используются как ограничения в целевых функциях алгоритмов [4].

Блок Е выполняет функции сбора выходных данных, расчета ключевых показателей эффективности, а также процедуры верификации (соответствие реальным данным) и валидации (соответствие аксиомам и целям системы).

Предложенная структурно-логическая схема служит основой для систематизации методов цифрового моделирования и создания целостного, верифицируемого цифрового двойника ИМТУ.

Ее применение позволяет:

− сократить время разработки моделей за счет структурирования и формализации расчетного аппарата;

− повысить адекватность цифрового двойника путем сквозного моделирования на основе единых правил-аксиом;

− выявлять и устранять системные противоречия на ранних этапах проектирования.

Таким образом, системный подход к аксиоматному моделированию мультимодальных транспортных узлов представляет собой синтез формального аксиоматического ядра с практическими алгоритмами управления, что создает методологический фундамент для построения адекватных цифровых двойников.

Следует отметить, что перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка программного комплекса, реализующего предложенную методику; детальная формализация аксиом для видов узлового транспорта (железнодорожный, автомобильный, водный, трубопроводный, воздушный, городской и др.); проведение натурных экспериментов для валидации моделей, построенных по предложенной методике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00869, https://rscf.ru/project/24-29-00869/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Развитие методики цифрового аксиоматного моделирования объекта транспортной инфраструктуры / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, В. В. Хан, Н. М. Магомедова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1 (68). – С. 22–32.

2 *Числов, О. Н.* Моделирование транспортных конфликтов в интеллектуальных системах управления технологическими процессами припортовых железнодорожных станций / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультиконференции. В 4 т. Т. 4. – Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. – Волгоград : ВолгГТУ, 2023. – С. 108–111.

3 *Луганченко, Н. М.* Принципы интеллектуализации в методах моделирования железнодорожных транспортно-логистических процессов / Н. М. Луганченко, О. Н. Числов // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 30 мая 2024 года. – М. : РУТ (МИИТ), 2024. – С. 239–246.

4 Общие принципы аксиоматики узловых транспортных процессов / Н. М. Луганченко, Е. Е. Мизгирева, А. О. Полунина, Е. В. Дараселия // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (60). – С. 53–58.

N. M. LUGANCHENKO, O. N. CHISLOV

ON THE ISSUE OF SYSTEMATIZATION OF DIGITAL ACCIOMAT MODELS OF TRANSPORT HUB PROCESSES

The paper proposes a further development of the method of digital axiomatic modeling of multimodal transport hubs, based on the formalization of fundamental rules and constraints that determine the system's functioning. A structural and logical scheme is presented that integrates modeling objects with a library of control algorithms through a unified system of axioms. This approach allows for a transition from fragmented object-based simulation to holistic, systematic, and verifiable design and optimization of transport processes, which is a crucial step in creating a high-level digital twin of the structural architecture of complex transport systems.

Получено 21.10.2025

ISSN 2664-5025. Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. Вып. 7. Гомель, 2025

УДК 656.211.025.2(512.31)

LIU KANGNI, HE HONG
Guangzhou Railway Polytechnic, Chinese People's Republic

RESEARCH ON PASSENGER FLOW OPTIMIZATION STRATEGY OF GUANGZHOU RAILWAY PASSENGER HUB UNDER THE BACKGROUND OF MULTI-CORE LINKAGE (An Empirical Analysis Based on Prediction Model and Operational Practice)

To solve the passenger flow management problems of Guangzhou railway passenger hub group, such as «single-core overload», «transfer obstruction» and «dispatching imbalance», and support the efficient operation of the «1-hour transportation circle» in the Guangzhou − Hong Kong − Macao Greater Bay Area, this paper takes the «five main and four auxiliary» hub system as the research object and constructs a systematic analysis framework of «passenger flow prediction − bottleneck diagnosis − strategy optimization − effect evaluation».