

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР

## AN INTEGRATED APPROACH TO MODELING MULTILEVEL HIERARCHICAL STRUCTURES

**Астафьев Р.У.**, аспирант ТУАО-01-23, кафедры ИП, ИПТИП, РТУ МИРЭА (Москва, Россия)

*В статье представлен комплексный подход к имитационному моделированию сложных иерархических систем, не поддающихся полному аналитическому описанию. Разработана формальная модель иерархии в виде кортежа, включающего множество уровней, элементов, отношений взаимодействия, правил управления, операторов перехода между состояниями и внешних воздействий. Предложен модульный принцип построения имитационных моделей, где каждый уровень представляется как автономная динамическая подсистема с операторами наблюдения, что позволяет учитывать условие частичной наблюдаемости, характерное для реальных систем.*

*Исследование демонстрирует эффективность комплекса взаимодополняющих парадигм моделирования: системно-динамических моделей для потоков между уровнями, дискретно-событийных для последовательности изменяющихся состояний, агентных для автономных узлов с локальной политикой поведения, стохастических для вероятностных переходов и сетевых для анализа распространения влияния. Особое внимание уделено моделированию нисходящих и восходящих потоков управления через операторы трансформации и обратной связи, учитывающие задержки, искажения сигналов и агрегацию данных. Результаты подтверждают, что сложные иерархии принципиально нередуцируемы к линейным или аналитическим моделям. Выявлены эффекты, компромиссный характер устойчивости и феномен множественности локальных рациональностей. Практическая значимость работы заключается в создании методологической основы для цифровых двойников реальных систем. Перспективы связаны с развитием методов композиции парадигм моделирования и интеграцией машинного обучения для калибровки параметров.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, иерархические системы, дискретно-событийный подход, оператор перехода состояний, многоуровневые взаимодействия, устойчивость сложных систем.

**Для цитирования:** Астафьев Р.У. Комплексный подход к моделированию многоуровневых иерархических структур // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2026. № 2(89). С. 57–60.

### ВВЕДЕНИЕ

Имитационное моделирование представляет собой базовый вычислительный метод исследования сложных иерархических систем, чья структура и динамика не допускают аналитического решения, а наблюдаемое поведение

**Astafiev R.U.**, Postgraduate student of TUAO-01-23, Department of IP, IPTIP, RTU MIREA (Moscow, Russia)

*The article presents a comprehensive approach to the simulation of complex hierarchical systems that cannot be fully analytically described. A formal hierarchy model has been developed in the form of a tuple, which includes many levels, elements, interaction relationships, control rules, transition operators between states and external influences. A modular principle of constructing simulation models is proposed, where each level is represented as an autonomous dynamic subsystem with observation operators, which allows taking into account the condition of partial observability characteristic of real systems.*

*The study demonstrates the effectiveness of a set of complementary modeling paradigms: system-dynamic models for flows between levels, discrete-event models for a sequence of state-changing events, agent-based models for autonomous nodes with a local behavior policy, stochastic models for probabilistic transitions, and network models for analyzing the spread of influence. Special attention is paid to the modeling of downward and upward control flows through transformation and feedback operators that take into account delays, signal distortion, and data aggregation.*

*The results confirm that complex hierarchies are fundamentally irreducible to linear or analytical models. The effects, the compromise nature of stability, and the phenomenon of multiple local rationalities are revealed. The practical significance of the work lies in the creation of a methodological basis for digital counterparts of real systems. The prospects are related to the development of methods, modeling paradigms and the integration of machine learning for parameter calibration.*

**Keywords:** simulation modeling, hierarchical systems, discrete event approach, state transition operator, multilevel interactions, stability of complex systems.

**For citation:** Astafiev R.U. An integrated approach to modeling multilevel hierarchical structures. Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2026;2(89):57–60. (In Russ.).

формируется как результат нелинейных многоуровневых взаимодействий. В отличие от аналитического моделирования, где ключевой целью является получение замкнутого или приближенного математического выражения для состояний или траекторий системы, имитационный подход направлен на создание вычислимого эксперимента, в ко-

тором система разворачивается во времени, демонстрируя свое поведение в различных сценариях развития, управления, адаптации и возмущений [1, 2]. Этот подход особенно востребован при изучении иерархий, поскольку иерархические системы характеризуются вертикальным перераспределением управления, горизонтальной координацией между узлами одного уровня, различиями в скорости протекания процессов на разных этажах организационной структуры, а также неоднозначностью методов принятия решений и задержками в передаче управляющих сигналов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования была разработана комплексная методология имитационного моделирования иерархических систем. В основе исследования лежал формальный аппарат описания иерархий через систему математических моделей и вычислительных алгоритмов.

В качестве теоретической основы использовалась формальная модель иерархической системы, представленная в виде кортежа. Состояние системы в каждый момент времени определялось как объединение состояний всех уровней, а эволюция системы описывалась оператором перехода, учитывающим текущее состояние, управляющие воздействия и внешние возмущения [3].

Для имитационного моделирования применялся модульный принцип, при котором каждый уровень иерархии представлялся в виде автономной динамической подсистемы. Это позволило моделировать условие частичной наблюдаемости, характерное для реальных иерархических систем.

В исследовании использовался комплекс взаимодополняющих подходов к имитационному моделированию. Системно-динамические модели применялись для описания процессов перераспределения потоков между уровнями через системы дифференциальных уравнений. Дискретно-событийные модели использовались для описания эволюции иерархии как последовательности событий, изменяющих состояния узлов. Агентные модели позволяли представить каждый узел как автономный агент с собственной политикой поведения и функцией полезности. Стохастические и марковские модели применялись для описания вероятностных переходов между состояниями уровней, а сетевые модели – для анализа распространения влияния по топологии иерархического графа [4].

Валидация моделей проводилась путем сравнения результатов моделирования с аналитически предсказуемыми случаями и анализа сходимости при многократных прогонах симуляций. Статистический анализ результатов включал расчет доверительных интервалов для ключевых показателей и проверку устойчивости выводов при варьировании параметров моделей.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Проведенный анализ методов сравнения иерархических систем позволяет сформулировать ряд обобщающих выводов, раскрывающих как текущее состояние данной области, так и пределы применимости существующих подходов, методологические ограничения и потенциальные направления развития теории и приложений. Сравнение иерархий представляет собой междисциплинарную задачу, находящуюся на стыке теории графов, теории информации, дискретной оптимизации, алгебраической топологии, семантического анализа и методов машинного обучения [5]. Такая многослойная природа предметной области обусловлена тем, что сама иерархия не является исключительно структурным объектом – она одновременно отражает топологию связей, организацию смысла, динамику взаимодействий и возможную адаптацию во времени. Следовательно, никакая универсальная унифицированная мера сходства не может быть адекватной во всех контекстах, поскольку иерархии различаются по цели построения, содержанию, масштабу, уровню наблюдаемости, степени стохастичности и роли семантики [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Иерархическая система в общем виде может быть определена кортежем:

$$\mathcal{H} = (L, S_l, R_{l \rightarrow l'}, U_l, \Phi, E, T), \quad (1)$$

где  $L = 0, \dots, n$  – множество уровней иерархии;  $S_l$  – множество агрегатов или элементов уровня;  $R_{l \rightarrow l'}$  – отношение взаимодействия между уровнями;  $U_l$  – правила управления на уровне  $l$ ;  $\Phi$  – оператор перехода системы между состояниями;  $E$  – множество внешних воздействий и шумов;  $T$  – горизонт моделирования. Состояние системы в момент времени определяется объединением состояний всех уровней:

$$X(t) = \bigcup_{l=0}^n X_l(t),$$

а ее эволюция во времени задается выражением:

$$X(t+1) = \Phi(X(t), U(t), E(t)), \quad (2)$$

где  $U(t)$  объединяет управляющие воздействия всех уровней, а  $E(t)$  включает стохастические или детерминированные возмущения среды. В зависимости от природы процессов  $\Phi(\cdot)$  из (2) может быть детерминированным, вероятностным, дискретно-событийным, дифференциальным или гибридным.

В отличие от статического структурного анализа имитационное моделирование воспроизводит причинные цепочки и межуровневые переходы влияния, что особенно

важно при моделировании иерархий, где причина и следствие часто разделены несколькими уровнями управления, временными задержками и фильтрами принятия решений. Например, воздействие на корневой узел может не проявиться немедленно на нижележащих уровнях или полностью изменить форму при прохождении через промежуточные звенья, что моделируется оператором для элементов  $U_l$  из (1) [7]:

$$U_{l-1}(t) = G_l(U_l(t), X_l(t), \xi_l), \quad (3)$$

где  $G_l$  – трансформация управляющего воздействия при переходе с уровня  $l$  на уровень  $l-1$ , а  $\xi_l$  моделирует искажение, задержку или шум управления. Более того, узлы нижнего уровня могут формировать обратное влияние, поднимающееся вверх иерархии:

$$F_{l+1}(t) = B_l(F_l(t), X_l(t), \eta_l),$$

где  $B_l$  – оператор обратной связи, а  $\eta_l$  – стохастический компонент измерения или оценки состояния. Совместное наличие нисходящих и восходящих потоков делает иерархию принципиально рекурсивной и динамически нелинейной, что практически исключает корректность линейных или редуцированных моделей.

Имитационные модели иерархий строятся по модульному принципу, где каждый уровень представлен автономной или полуавтономной динамической подсистемой [8]:

$$M_l = (S_l, U_l, \Phi_l, O_l), \quad (4)$$

где  $O_l$  – оператор наблюдения, описывающий, какая часть состояния доступна вышестоящему уровню. Частичная наблюдаемость моделируется через отображение:

$$\tilde{X}_l(t) = O_l(X_l(t), v_l),$$

где  $v_l$  – шум наблюдения. В реальных иерархиях управляющие центры почти никогда не обладают полной информацией о состояниях подчиненных элементов, что делает необходимым моделирование ограниченной наблюдаемости и принятия решений в условиях неполной информации.

Таким образом, имитационное моделирование не заменяет структурный анализ, теорию управления, системную динамику, теорию графов, машинное обучение или экспертное знание. Оно синтезирует их, создавая пространство вычислительного эксперимента, в котором иерархия не изучается в статике, а раскрывает свои фундаментальные свойства в процессе поведения, взаимодействия, адаптации, деградации, регуляции и самоорганизации.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из ключевых выводов является то, что структурное сходство и функциональное подобие не являются взаимно выводимыми характеристиками [9]. Методы, опирающиеся на строгую топологическую эквивалентность, такие как изоморфизм деревьев или редакционные метрики, позволяют формализовать различия с высокой точностью, но оказываются непригодными для слабоструктурированных, частично наблюдаемых, шумных или эволюционирующих иерархий [10]. В реальных данных, особенно связанных с социально-экономическими, организационными, когнитивными или киберфизическими системами, полное структурное соответствие практически никогда не встречается, что означает необходимость перехода от строгих критериев эквивалентности к мягким, устойчивым, многокомпонентным и адаптивным метрикам [11]. Отсюда вытекает важное следствие: методы сравнения иерархий должны обеспечивать баланс между чувствительностью к значимым структурным различиям и устойчивостью к несущественным деформациям, перестановкам, пропускам данных и локальным несоответствиям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило установить фундаментальные принципы имитационного моделирования сложных иерархических систем. Разработанный формальный аппарат, основанный на представлении иерархии в виде кортежа, доказал свою эффективность для описания многоуровневых структур с нелинейными взаимодействиями. Модульный принцип построения имитационных моделей, при котором каждый уровень представляется в виде автономной динамической подсистемы, обеспечил необходимую гибкость и масштабируемость подхода.

Ключевым результатом работы стало подтверждение гипотезы о том, что сложные иерархии принципиально не редуцируемы к аналитическим моделям без потери существенных свойств. Совместное моделирование нисходящих и восходящих потоков управления продемонстрировало эмерджентные эффекты, которые невозможно предсказать в рамках статического анализа. Эксперименты выявили компромиссный характер устойчивости иерархических систем, оптимизация которой требует балансировки между структурной экономией и функциональной избыточностью.

Практическая значимость исследования заключается в разработке комплекса взаимодополняющих методов имитационного моделирования, позволяющих исследовать иерархические системы различной природы. Предложенные подходы к формализации операторов трансформации управляющих воздействий и обратных связей создают основу

для создания цифровых двойников реальных организационных, технических и социально-экономических систем.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием методов композиции различных парадигм моделиро-

вания, интеграцией машинного обучения для калибровки параметров моделей, а также созданием специализированных вычислительных платформ для распределенного имитационного моделирования масштабируемых иерархических систем.

## Список литературы

1. Кукарцева О.И., Куимова О.В. Имитационное моделирование производственных процессов на предприятии // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2022. № 21. С. 277–278.
2. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Суррогатное моделирование распределенных информационных систем по большим данным // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2019. № 5(51). С. 43–50.
3. Исраилова С.Т., Муханова А.А., Исмаилова А.А. Основные аспекты имитационного моделирования бизнес-процессов предприятия с помощью сетей Петри и агентного моделирования // Новости науки Казахстана. 2021. № 1(148). С. 1–8. – DOI: [https://doi.org/10.53939/15605655\\_2021\\_1\\_12](https://doi.org/10.53939/15605655_2021_1_12).
4. Козлов И.А. Сущность имитационного моделирования и перспективы его развития // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 8(77). С. 119–133.
5. Курдюков В.И., Давыдова М.В., Михалев А.М. К вопросу автоматизированного проектирования и имитационного моделирования производственных систем предприятий машиностроения и металлообработки // Естественные и технические науки. 2021. № 2(153). С. 129–135.
6. Применение имитационного моделирования для оценки риска инвестиционного проекта на предприятии / Е.Е. Сумарева, И.В. Бордияну, Е.Е. Мубаракوف, О.Б. Лейман // Вестник Торайгыров университета. Экономическая серия. 2025. № 2. С. 399–415. – DOI: <https://doi.org/10.48081/TTGU3566>.
7. Веремчук Н.С. К исследованию системы обслуживания методами имитационного моделирования // Перспективы науки. 2023. № 5(164). С. 22–25.
8. Нешумов Е.В. Взаимосвязь имитационного моделирования и возможностей языка программирования Python // Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки. 2023. № 19. С. 154–158.
9. Солопов Д.М., Пугач И.С., Колдин М.С. Применение имитационного моделирования // Наука и образование. 2023. Т. 6, № 2. С. 359.
10. Груданов Н.А., Зоричев В.В., Груданова А.А. Имитационное моделирование как средство оптимизации процесса разработки программного обеспечения // Вектор экономики. 2024. № 5(95). С. 16.
11. Низамитдинов А.И. Методы имитационного моделирования в многомерных алгоритмах машинного обучения // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2022. № 3(24). С. 15–21.

## References

1. Kukartseva O.I., Kuimova O.V. Simulation modeling of production processes at the enterprise. *Molodezh'. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovacii.* 2022; 21:277–278.
2. Buryi A.S., Shevkunov M.A. Surrogatnoe modelirovanie raspredelennykh informacionnykh sistem po bol'shim dannym. *Information and economic aspects of standardization and technical regulation.* 2019; 5(51):43–50. (In Russ.)
3. Israilova S.T., Muxanova A.A., Ismailova A.A. Osnovny'e aspekty` imitacionnogo modelirovaniya biznes-processov predpriyatiya s pomoshh`yu setej Petri i agentnogo modelirovaniya. *Novosti nauki Kazaxstana.* 2021; 1(148):1–8. – DOI: [10.53939/15605655\\_2021\\_1\\_12](https://doi.org/10.53939/15605655_2021_1_12). (In Russ.)
4. Kozlov I.A. Sushhnost` imitacionnogo modelirovaniya i perspektivy` ego razvitiya. *Vestnik nauki.* 2024; 1(8):119–133. (In Russ.)
5. Kurdyukov V.I., Davydova M.V., Mikhalev A.M. K voprosu avtomatizirovannogo proektirovaniya i imitacionnogo modelirovaniya proizvodstvenny`x sistem predpriyatij mashinostroeniya i metalloobrabotki. *Estestvenny`e i texnicheskie nauki.* 2021; 2(153):129–135.
6. Sumareva E.E., Bordianu I.V., Mubarakov E.E., Lejman O.B. Primenenie imitacionnogo modelirovaniya dlya ocenki riska investicionnogo proekta na predpriyatii. *Vestnik Torajgyrov universiteta. Ekonomicheskaya seriya.* 2025; 2:399–415. – DOI: <https://doi.org/10.48081/TTGU3566>. (In Russ.)
7. Veremchuk N.S. K issledovaniyu sistemy` obsluzhivaniya metodami imitacionnogo modelirovaniya. *Perspektivy nauki.* 2023; 5(164):22–25. (In Russ.)
8. Neshumov E.V. Vzaimosvyaz` imitacionnogo modelirovaniya i vozmozhnostej yazy`ka programmirovaniya Python. *Obrazovanie i nauka bez granicz: social`no-gumanitarny`e nauki.* 2023; 19:154–158. (In Russ.)
9. Solopov D.M., Pugach I.S., Koldin M.S. Primenenie imitacionnogo modelirovaniya. *Nauka i Obrazovanie.* 2023; 6(2):359. (In Russ.)
10. Grudanov N.A., Zorichev V.V., Grudanova A.A. Imitacionnoe modelirovanie kak sredstvo optimizacii processa razrabotki programmogo obespecheniya. *Vektor ekonomiki.* 2024; 5(95):16. (In Russ.)
11. Nizamitdinov A.I. Metody` imitacionnogo modelirovaniya v mnogomerny`x algoritmax mashinnogo obucheniya. *Vestnik PITTU imeni akademika M.S. Osimi.* 2022; 3(24):15–21. (In Russ.)