

УДК 69.05

© О. Ю. Михальченко, канд. техн. наук
(Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск, Россия)
E-mail: oleg_mik@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-1-61-66

© O. Yu. Mikhailchenko, PhD in Sci. Tech.
(Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russia)
E-mail: oleg_mik@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ХАОСА ДЛЯ АНАЛИЗА БИФУРКАЦИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

APPLICATION OF CHAOS THEORY TO CARRY OUT THE ANALYSIS OF BIFURCATIONS IN CONSTRUCTION SYSTEMS

Рассматривается применение теории хаоса для анализа бифуркаций в строительных системах, когда малые отклонения в параметрах таких систем могут приводить к резким изменениям их состояния, вызывая каскадные сбои, срывы сроков и перерасход бюджета. Приводятся математические модели, описывающие критические состояния строительных проектов, а также анализируются ключевые параметры, влияющие на возникновение хаоса. Рассматриваются методы прогнозирования и предотвращения бифуркаций с использованием математического моделирования и адаптивного управления. Предложенные подходы направлены на повышение устойчивости строительных систем, минимизацию рисков и оптимизацию ресурсного планирования.

Ключевые слова: управление рисками, метод анализа иерархий, теория хаоса, бифуркации, метод Монте-Карло.

The article discusses the application of chaos theory to analyze bifurcations in construction systems, when small deviations in the parameters of such systems can lead to dramatic changes in their state, causing cascading failures, deadlines and budget overruns. Mathematical models describing critical states of construction projects are given, and the key parameters influencing the emergence of chaos are analyzed. Methods of predicting and preventing bifurcations using mathematical modeling and adaptive control are considered. The proposed approaches are aimed at improving the stability of construction systems, minimizing risks and optimizing resource planning.

Keywords: risk management, hierarchy analysis method, chaos theory, bifurcations, Monte Carlo method.

Введение

Теория хаоса является мощным инструментом для анализа сложных динамических систем, в которых небольшие изменения параметров могут приводить к резким и необратимым последствиям. В строительстве это проявляется в виде срывов сроков, резкого увеличения затрат, остановки строительства или даже полного отказа от проекта. Анализ бифуркаций в строительных системах позволяет выявить критические

точки, при которых система из стабильного состояния переходит в хаотическое, вызывая цепную реакцию проблем, включая перераспределение ресурсов, финансовые потери и судебные разбирательства. Одним из основных подходов к такому анализу является математическое моделирование, позволяющее заранее определить вероятные сценарии развития событий и разработать меры предотвращения хаоса в строительной системе [1, 2].

Ключевым аспектом при изучении бифуркаций в строительных системах является идентификация управляющих параметров, которые оказывают наиболее значительное влияние на устойчивость проекта. К таким параметрам можно отнести продолжительность выполнения отдельных этапов строительства, финансовые затраты, доступность материалов и рабочей силы, уровень внешнего контроля и надзора и т. д. Малейшие отклонения в любом из этих параметров могут накапливаться и в конечном итоге приводить к каскадным сбоям, которые значительно увеличивают вероятность хаотического развития событий. Для их описания используются математические модели, основанные на анализе нелинейных динамических систем, в которых малые изменения начальных условий могут вызывать кардинальные изменения конечного результата [3–6].

Материалы и методы

В исследовании использовались следующие методы: теория хаоса, метод Монте-Карло, метод анализа иерархий, анализ, синтез, моделирование.

Результаты

В традиционных подходах к управлению строительными процессами предполагается, что строительная система развивается линейно, а отклонения можно предсказать и контролировать [3, 4]. Однако реальность показывает, что в строительстве часто возникают ситуации, когда даже небольшие изменения в ресурсах, финансировании или организационных процессах могут вызвать значительные сбои. Это связано с наличием нелинейных взаимосвязей между элементами системы, что делает их подверженными бифуркациям и хаотическим изменениям.

Игнорирование этих нелинейных зависимостей может приводить к серьезным ошибкам в планировании и управлении проектами. Например, увеличение финансирования не всегда ведет к пропорциональному сокращению сроков строительства, так как суще-

ствуют пороговые значения, после которых дополнительные ресурсы не дают ожидаемого эффекта или даже негативно сказываются на эффективности работ. Аналогично небольшие задержки на ранних этапах проекта могут накапливаться и в дальнейшем приводить к лавинообразному увеличению сроков ввода объекта в эксплуатацию, особенно если имеются жесткие зависимости между последовательными этапами строительства.

Нелинейные эффекты проявляются также в зависимости затрат от времени выполнения работ. В некоторых случаях продление сроков приводит к росту затрат из-за инфляции, дополнительных расходов на содержание строительных площадок, штрафных санкций и других факторов. Однако в ряде случаев, напротив, растягивание сроков может позволить более равномерно распределить финансовые потоки и снизить нагрузку на бюджет, что делает анализ этих взаимосвязей критически важным. Кроме того, в строительных системах наблюдаются эффекты, связанные с синергией или, наоборот, с эффектами перегрузки. Например, увеличение количества рабочих на площадке может повысить скорость выполнения работ, но после определенного предела начнет снижать эффективность из-за роста организационных сложностей, увеличения вероятности ошибок и снижения производительности труда.

Нелинейные эффекты также играют ключевую роль в оценке рисков и вероятности возникновения бифуркаций в строительных системах. При достижении определенных критических значений параметров системы возможен переход в принципиально новое состояние, что может выражаться в резком изменении темпов строительства, перераспределении финансовых потоков или необходимости пересмотра всей организационной структуры проекта. Например, если задержка на одном из ключевых этапов строительства достигает критического уровня,

может потребоваться кардинальная смена подрядчиков, изменение технологий строительства или даже переработка проектной документации, что значительно увеличивает затраты и сроки строительства.

Для учета этих факторов необходимо применять комплексный подход, включающий динамическое моделирование, анализ сценариев развития и адаптивное управление. Использование цифровых технологий, таких как BIM (Building Information Modeling), позволяет учитывать нелинейные зависимости между элементами строительной системы и прогнозировать возможные сценарии развития событий. Методы машинного обучения и анализ больших данных помогают выявлять скрытые зависимости между параметрами системы, что позволяет более точно прогнозировать риски и повышать эффективность управления проектами.

В строительных проектах бифуркации проявляются в виде критических точек, при достижении которых происходит кардинальное изменение хода работ [7–9]. Например, если подрядчик сталкивается с неожиданными задержками поставок или перерасходом бюджета, это может привести к цепной реакции, в результате которой строительство полностью останавливается или существенно затягивается. В таких случаях система переходит из одного устойчивого состояния в другое, но этот переход носит хаотический характер и может привести к неуправляемым последствиям. Теория хаоса позволяет выявлять моменты, когда вероятность таких бифуркаций становится критической, а также определять меры для предотвращения негативных последствий. Одним из ключевых аспектов хаотического поведения является чувствительность к начальному состоянию, известная как эффект бабочки. В строительстве это может означать, что даже незначительные изменения на ранних этапах проекта могут привести к серьезным отклонениям на поздних стадиях. Например, небольшая

ошибка в проектировании или незначительная задержка при согласовании документации могут вызвать каскадную цепочку сбоев, приводящую к значительному увеличению сроков и затрат.

Для анализа бифуркаций в строительных системах следует учитывать основные параметры, влияющие на устойчивость проекта. Это делает необходимым разработку методов раннего выявления хаотических процессов и предотвращения бифуркационных переходов. При моделировании возможных сценариев развития проекта с учетом вероятностных характеристик и выявлении точек, в которых возникает наибольшая чувствительность к внешним воздействиям, необходимо использовать методы математического моделирования, в том числе стохастические процессы, метод Монте-Карло и анализ чувствительности [10–12].

Рассмотрим модель строительного проекта как систему, состоящую из N взаимосвязанных этапов, каждый из которых характеризуется определенной продолжительностью выполнения T_i и затратами C_i . Тогда общая продолжительность проекта определяется как сумма длительностей критического пути:

$$T = \sum_{i \in K} T_i, \quad (1)$$

где K — множество работ, входящих в критический путь.

Аналогично общие затраты на проект рассчитываются как сумма затрат на отдельные работы с учетом стохастических флуктуаций:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i + \sum_{j=1}^M R_j, \quad (2)$$

где R_j — дополнительные затраты, возникающие в результате неопределенных факторов; M — количество случайных возмущений.

Для учета вероятностных характеристик модели применим метод Монте-Карло. Определим случайные величины T_i и C_i как случайные функции, подчиняющиеся опре-

деленному распределению, например, нормальному:

$$T_i \sim N\left(\mu_{T_i}, \sigma_{T_i}^2\right); \quad (3)$$

$$C_i \sim N\left(\mu_{C_i}, \sigma_{C_i}^2\right), \quad (4)$$

где $\mu_{T_i}, \sigma_{T_i}^2$ — математическое ожидание и дисперсия времени выполнения работы i ; $\mu_{C_i}, \sigma_{C_i}^2$ — математическое ожидание и дисперсия затрат.

Метод Монте-Карло заключается в генерации большого количества реализаций случайных величин и вычислении соответствующих значений T и C . Это позволяет определить вероятность превышения допустимых значений сроков и бюджета:

$$P(T > T_{\text{доп}}) = \frac{\text{Количество симуляций, где } T > T_{\text{доп}}}{\text{Общее количество симуляций}}; \quad (5)$$

$$P(C > C_{\text{доп}}) = \frac{\text{Количество симуляций, где } C > C_{\text{доп}}}{\text{Общее количество симуляций}}. \quad (6)$$

На основе этих вероятностей можно выделить критические точки проекта, где вероятность отклонения от плановых показателей становится значительной.

Определим чувствительность проекта к изменению параметров. Чувствительность продолжительности проекта и затрат к изменению параметра x можно выразить через частную производную:

$$S_T(x) = \frac{dT}{dx}; \quad (7)$$

$$S_C(x) = \frac{dC}{dx}, \quad (8)$$

где x — параметр, влияющий на проект (например, задержка поставок, изменение стоимости материалов).

Если чувствительность превышает пороговое значение, то становится критической и необходимо предусмотреть дополнительные меры по снижению ее влияния.

Применение теории хаоса в строительных системах также предполагает использование методов адаптивного управления. Управление проектом должно быть гибким, с воз-

можностью оперативного реагирования на изменения и корректировки плана в зависимости от текущей ситуации. Например, при выявлении критического увеличения вероятности возникновения бифуркации можно заранее предусмотреть резервные ресурсы, альтернативных поставщиков или дополнительные механизмы финансирования. Такой подход позволяет не только минимизировать негативные последствия хаотических изменений, но и повысить устойчивость строительных проектов в условиях неопределенности.

Адаптивный подход включает динамическое перераспределение ресурсов, что снижает вероятность каскадных сбоев и повышает устойчивость строительных систем. В условиях неопределенности строительных процессов ключевым элементом управления становится функция $U(x)$, которая минимизирует вероятность выхода за допустимые границы параметров проекта. Основной задачей является определение такой стратегии перераспределения ресурсов, при которой критические точки, связанные с бифуркациями, удастся сгладить, тем самым предотвращая хаотическое поведение системы.

Рассматривая строительную систему как совокупность взаимосвязанных процессов, можно определить, что каждое изменение одного из параметров влияет на всю систему в целом. В этом случае адаптивное управление должно базироваться на непрерывном анализе данных и корректировке стратегий распределения ресурсов.

Пусть $P(T > T_{\text{доп}})$ и $P(C > C_{\text{доп}})$ обозначают вероятность превышения допустимой продолжительности и затрат соответственно. Тогда функция управления $U(x)$ должна минимизировать суммарную вероятность нарушения плановых параметров проекта:

$$\min_{U(x)} P(T > T_{\text{доп}}) + P(C > C_{\text{доп}}). \quad (9)$$

Это достигается путем перераспределения времени выполнения работ, финансо-

вых вложений и материально-технических ресурсов таким образом, чтобы компенсировать возникающие отклонения.

Для практической реализации адаптивного подхода необходимо регулярно обновлять данные о текущем состоянии проекта, включая информацию о сроках выполнения отдельных этапов, доступности ресурсов и финансовом обеспечении. Использование методов машинного обучения и прогнозирования на основе данных ранее реализованных проектов позволяет выявлять тренды и потенциальные узкие места, требующие вмешательства. Важным аспектом является разработка критериев принятия решений, позволяющих определять, в какой момент необходимо корректировать распределение ресурсов. Для этого используются методы оптимизации, учитывающие баланс между снижением рисков и экономической эффективностью.

Введение функции управления $U(x)$ позволяет не только минимизировать вероятность выхода за допустимые границы, но и повысить общую надежность строительной системы. В зависимости от характера строительного проекта и его специфики могут применяться различные стратегии адаптивного управления, включая перераспределение бюджетных средств между этапами строительства, корректировку логистических схем поставок, изменение графиков работ или привлечение дополнительных трудовых ресурсов. Важно, чтобы система управления оставалась достаточно гибкой и могла оперативно реагировать на изменения входных параметров, что обеспечивается за счет применения цифровых технологий, мониторинга в режиме реального времени и интеграции различных информационных потоков.

Эффективность адаптивного подхода во многом зависит от качества исходных данных, используемых для принятия решений. Важно учитывать возможные источники

неопределенности, такие как нестабильность цен на строительные материалы, изменение регуляторных требований, погодные условия и человеческий фактор. Включение вероятностных характеристик в модели управления позволяет оценивать диапазон возможных отклонений и заранее разрабатывать корректирующие меры. В результате удастся не только снизить вероятность возникновения бифуркаций, но и повысить устойчивость строительных проектов к внешним воздействиям.

Заключение

Для успешного применения теории хаоса в строительных системах необходимо разрабатывать комплексные модели, учитывающие нелинейную динамику, чувствительность к начальному состоянию и вероятность каскадных эффектов. Это позволит повысить точность прогнозирования, улучшить механизмы управления рисками и разработать стратегии повышения устойчивости строительных проектов. В конечном итоге использование таких подходов приведет к сокращению сбоев, уменьшению перерасхода бюджета и повышению эффективности строительных процессов.

Библиографический список

1. Bak P. How nature works: The science of self-organized criticality. Copernicus. 1996. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1>
2. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Physical Review A*, 1988. 38 (1), pp. 364–374. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>
3. Гусаков А. А., Веремеенко С. А., Гинзбург А. В. и др. Организационно-технологическая надежность строительства М.: SvR-Аргус, 1994. 472 с.
4. Гусаков А. А. Системотехника в строительстве. М.: Стройиздат, 1993. 245 с.
5. Тихомирова О. Г. Управление проектом: комплексный подход и системный анализ. М.: ИНФРА-М, 2024. 300 с.
6. Астафьева О. Е., Моисеенко Н. А., Козловский А. В., Шемякина Т. Ю., Серов В. М. Риск-менеджмент в строительстве. М.: ИНФРА-М, 2022. 183 с.

7. Лapidус А. А., Файзуллин И. Э., Михальченко О. Ю. Метод формирования организационно-технических решений при строительстве объектов капитального строительства // Строительное производство. 2024. №4. С. 3–8.

8. Михальченко О. Ю., Лapidус А. А., Файзуллин И. Э. Бифуркационные процессы в управлении сроками и затратами строительных проектов // Вестник Евразийской науки. 2024. Т 16, № 6. URL: <https://esj.today/PDF/34SAVN624.pdf>

9. Михальченко О. Ю. Организационная надежность планирования строительства объектов : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2012. 150 с.

10. Rubinstein R. Y., Kroese D. Simulation and the Monte Carlo method // John Wiley & Sons. 2011.

11. Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Юрайт, 2024. 323 с.

12. Graham C., Talay D. Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods: Mathematical Foundations of Stochastic Simulation. New York: Springer, 2013. 260 p. DOI 10.1007/978-3-642-39363-1.

References

1. Bak P. *How nature works: The science of self-organized criticality*. Copernicus. 1996. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1>

2. Bak P, Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Physical Review A*, 1988, no. 38 (1), pp. 364–374. Available at: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>.

3. Gusakov A. A., Veremeenko S. A., Ginzburg A. V., et al. *Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitel'stva* [Organizational and technological reliability of construction]. Moscow, SvR-Argus Publ., 1994, 472 p.

4. Gusakov A. A. *Sistemotekhnika v stroitel'stve* [Systems engineering in construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1993, 245 p.

5. Tikhomirova O. G. *Upravlenie proektom: kompleksniy podkhod i sistemniy analiz* [Project management: complex approach and system analysis]. Moscow, INFRA-M Publ., 2024, 300 p.

6. Astaf'eva O. E., Moiseenko N. A., Kozlovskiy A. V., Shemyakina T. Yu., Serov V. M. *Risk-menedzhment v stroitel'stve* [Risk-management in construction]. Moscow, INFRA-M Publ., 2022, 183 p.

7. Lapidus A. A., Fayzullin I. E., Mikhal'chenko O. Yu. *Metod formirovaniya organizatsionno-tekhnicheskikh resheniy pri stroitel'stve ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva* [Method of formation of organizational and technical solutions in the construction of capital construction projects]. *Stroitel'noe proizvodstvo – Construction Industry*, 2024, no. 4, pp. 3–8.

8. Mikhal'chenko O. Yu., Lapidus A. A., Fayzullin I. E. *Bifurkatsionnye protsessy v upravlenii srokami i zatratami stroitel'nykh proektov* [Bifurcation processes in time and cost management of construction projects]. *Vestnik Evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2024, vol. 16, no. 6. Available at: <https://esj.today/PDF/34SAVN624.pdf>

9. Mikhal'chenko O. Yu. *Organizatsionnaya nadezhnost' planirovaniya stroitel'stva ob'ektov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Organizational reliability of planning of construction of objects. PhD in Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2012, 150 p.

10. Rubinstein R. Y., Kroese D. *Simulation and the Monte Carlo method*. John Wiley & Sons Publ., 2011.

11. Mikhailov G. A. *Statisticheskoe modelirovanie. Metody Monte-Karlo* [Statistical modeling. Monte Carlo methods]. Moscow, Yurayt Publ., 2024, 323 p.

12. Graham C., Talay D. *Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods: Mathematical Foundations of Stochastic Simulation*. New York: Springer Publ., 2013, 260 p. DOI 10.1007/978-3-642-39363-1.