



УДК: 69.05

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.11

EDN: MHSATY

Бифуркации в календарно-сетевом планировании строительных проектов: методы прогнозирования и адаптивного управления

О.Ю. Михальченко¹

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Календарно-сетевое планирование играет важную роль в управлении строительными проектами, обеспечивая эффективное распределение ресурсов и контроль сроков выполнения работ. Однако динамическая природа строительного процесса приводит к возникновению неожиданных изменений, известных как бифуркации, когда малые отклонения в параметрах вызывают резкие перестройки сетевого графа проекта. Бифуркации могут быть вызваны различными факторами, включая задержки поставок, нехватку ресурсов, неблагоприятные погодные условия и изменения в законодательстве. В результате нарушается критический путь проекта, что приводит к сдвигам сроков и увеличению затрат.

Цель данного исследования состоит в разработке моделей, учитывающих бифуркации в календарно-сетевом планировании.

Задачи исследования включают:

- Изучение механизмов возникновения бифуркаций в строительных проектах в контексте календарно- сетевого планирования, определение их влияния на сроки и стоимость строительства.

- Разработку адаптивных методов управления строительными проектами для минимизации рисков, связанных с бифуркациями.

Результаты. В работе рассматриваются различные типы бифуркаций, включая топологическую бифуркацию, бифуркацию ресурсных ограничений и бифуркацию внешних условий. Анализируются математические методы прогнозирования бифуркаций. Кроме того, исследуются подходы к управлению бифуркациями.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что внедрение математических моделей для прогнозирования бифуркаций строительных проектов, а также анализ временных резервов и критических путей, позволяет более точно предсказывать возможные изменения в проекте, что помогает своевременно корректировать планирование и избегать негативных последствий. Современные строительные проекты становятся всё более сложными и масштабными, что требует применения гибких методов управления и прогнозирования возможных изменений. Эффективное предсказание бифуркаций и своевременное внесение корректировок в планирование позволяют минимизировать риски, повысить экономическую эффективность строительства и обеспечить его своевременное завершение.

Ключевые слова: адаптивное управление, управление рисками, строительство, теория хаоса, бифуркации, метод Монте-Карло, организационно – технологические решения

Для цитирования: Михальченко О.Ю. Бифуркации в календарно-сетевом планировании строительных проектов: методы прогнозирования и адаптивного управления // Известия КГАСУ, 2025, № 1(71), с. 122-129, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.11, EDN: MHSATY

Bifurcations in network scheduling of construction projects: methods of forecasting and adaptive management

O. Yu. Mikhhalchenko¹

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russia

Abstract. Problem statement. Network scheduling plays an important role in construction project management by ensuring efficient resource allocation and schedule control. However, the dynamic nature of the construction process leads to unexpected changes, known as bifurcations, when small deviations in parameters cause abrupt restructuring of the project network graph. Bifurcations can be caused by various factors, including supply delays, resource shortages, adverse weather conditions, and changes in legislation. As a result, the critical path of the project is disrupted, leading to schedule shifts and increased costs.

The purpose of this study is to develop models that take into account bifurcations in network scheduling.

The research objectives include:

- Studying the mechanisms of bifurcation occurrence in construction projects within the context of network scheduling, as well as determining their impact on project timelines and costs.
- Developing adaptive management methods for construction projects to minimize risks associated with bifurcations.

Results. The paper discusses various types of bifurcations, including topological bifurcation, resource constraint bifurcation, and external condition bifurcation. Mathematical methods for forecasting bifurcations are analyzed. Additionally, approaches to managing bifurcations are studied.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the implementation of mathematical models for forecasting bifurcations in construction projects, as well as the analysis of time buffers and critical paths, allows for more accurate forecasting of potential changes in a project. This helps to adjust planning in a timely manner and avoid negative consequences. Modern construction projects are becoming increasingly complex and large-scale, requiring the application of flexible management methods and forecasting of possible changes. Effective prediction of bifurcations and timely adjustments to planning help minimize risks, improve the economic efficiency of construction, and ensure its timely completion.

Keywords: adaptive management, risk management, construction, chaos theory, bifurcations, Monte Carlo method, organizational and technological solutions

For citation: Mikhhalchenko O.Yu. Bifurcations in network scheduling of construction projects: methods of forecasting and adaptive management // News of KSUAE, 2025, № 1(71), p. 122-129, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.11, EDN: MHSATY

1. Введение

Календарно-сетевое планирование является одним из ключевых инструментов управления строительными проектами, позволяя оптимизировать выполнение работ, рационально распределять ресурсы и контролировать сроки [1, 2]. В строительстве большинство процессов взаимосвязаны, и любые задержки или изменения в одном этапе могут вызвать цепную реакцию, приводящую к сдвигам сроков и увеличению бюджета [3, 4]. Именно поэтому разработка точных математических моделей, учитывающих динамику выполнения работ, становится важной задачей.

Существующие методы календарно-сетевого планирования основаны на линейных зависимостях между этапами строительства и предполагают предсказуемость выполнения работ [5, 6]. Традиционные методы, например, критический путь, метод PERT, не учитывают внезапные перестройки сетевой структуры, вызванные накоплением мелких отклонений. Они предполагают возможность корректировки сроков за счет временных

резервов, но не учитывают нелинейные эффекты. Однако, в процессе реализации строительного проекта могут возникать внезапные изменения, известные как бифуркации, которые приводят к резкому изменению критического пути проекта [7, 8]. Эти изменения могут быть вызваны различными факторами, такими как задержки в поставках, нехватка ресурсов, ухудшение погодных условий или макроэкономические колебания. В отличие от постепенных корректировок графика работ, бифуркации носят нелинейный характер и могут кардинально изменить сетевую структуру проекта, приводя к значительным последствиям. Бифуркации в контексте календарно-сетевого планирования представляют собой точки, в которых малое изменение исходных данных вызывает кардинальные перестройки в структуре выполнения работ, что может привести к срыву сроков или перерасходу ресурсов. При возникновении бифуркаций указанные методы теряют свою эффективность, что приводит к неконтролируемым задержкам и перерасходу бюджета. Предсказание таких бифуркаций и разработка механизмов адаптивного управления становятся ключевыми задачами в строительном менеджменте [9-11].

Адаптивное управление строительными проектами предполагает резервирование ресурсов, перераспределение работ на критическом пути и автоматическую коррекцию сетевого графа. Использование цифровых технологий и систем мониторинга позволяет выявлять ранние признаки возможных бифуркаций, минимизировать их негативное влияние и обеспечивать успешную реализацию проекта. Комплексный подход к прогнозированию и управлению бифуркациями позволяет снизить риски срыва сроков и перерасхода бюджета, делая строительные проекты более устойчивыми и предсказуемыми.

Цель данного исследования состоит в разработке моделей, учитывающих бифуркации в календарно-сетевого планировании.

Задачи исследования включают:

Изучение механизмов возникновения бифуркаций в строительных проектах в контексте календарно-сетевого планирования, определение их влияния на сроки и стоимость строительства.

Разработку адаптивных методов управления строительными проектами для минимизации рисков, связанных с бифуркациями.

2. Материалы и методы

Для прогнозирования бифуркаций в строительных проектах используются различные методы, позволяющие заранее выявлять критические точки, в которых небольшие изменения параметров могут привести к резким скачкам в сроках и стоимости реализации. Эти методы основаны на математическом моделировании, анализе данных, экспертных оценках и цифровых технологиях, обеспечивающих мониторинг динамики проекта.

Одним из подходов является применение метода Монте-Карло [12,13], который заключается в многократном моделировании возможных изменений параметров проекта и выявлении сценариев, при которых происходит бифуркация. Этот метод позволяет оценить вероятность возникновения критических ситуаций и заранее предусмотреть организационно – технологические решения.

Кроме того, для анализа нелинейных процессов в строительных проектах, где даже небольшие отклонения в параметрах могут приводить к резким изменениям динамики, использованы основные положения теории хаоса. В строительных системах хаотическое поведение проявляется в виде неожиданных задержек, изменения критического пути и перераспределения ресурсов. Применение этой теории позволяет выявить ключевые параметры, наиболее подверженные колебаниям, и предсказать вероятность их влияния на общий ход проекта [14].

3. Результаты и обсуждение

Математическая модель календарно-сетевого планирования строительного проекта может быть представлена в виде ориентированного графа. Пусть $G=(V,E)$ — ориентированный граф, представляющий строительный проект, где V — множество работ, а E — связи, определяющие порядок выполнения работ. Для каждой работы $i \in V$ заданы:

Длительность t_i ;

Затраты C_i ;

Ресурсы R_i ;

Раннее начало работ $РН_i$ и позднее начало работ $ПН_i$, вычисляемые по формулам:

$$РН_i = \max_{j \in \text{предшественники}(i)} (РО_j) \quad (1)$$

$$ПН_i = РО_i - t_i \quad (2)$$

$$РО_i = РН_i + t_i \quad (3)$$

$$РО_i = \min_{j \in \text{последователи}(i)} (ПН_j) \quad (4)$$

где $РО_i$ и $ПН_i$ — раннее и позднее окончание работы соответственно.

Каждая работа имеет определённую длительность, а также потребляет различные ресурсы, такие как трудозатраты, материалы и оборудование. Целью планирования является нахождение оптимального расписания выполнения всех работ с учётом их зависимостей, минимизации времени реализации проекта и рационального использования ресурсов.

Для каждой вершины графа определяется момент начала и окончания выполнения работы, при этом начальное событие работы зависит от окончания предшествующих работ, что формализуется через систему временных ограничений. Ключевой характеристикой сетевого графа является критический путь, представляющий собой самую длинную последовательность зависимых работ, определяющую минимально возможную длительность проекта. Работы, входящие в критический путь, требуют особого внимания, поскольку любое их отклонение по времени напрямую влияет на сроки завершения проекта.

Моделирование календарно-сетевого планирования также включает анализ временных резервов работ, которые позволяют варьировать начало и окончание работ без изменения общего срока проекта.

В динамической среде строительства даже небольшие отклонения в сроках выполнения отдельных задач, изменении доступности ресурсов или внешних условиях могут спровоцировать радикальную перестройку сетевого графа проекта. Это явление делает управление строительными процессами особенно сложным, поскольку традиционные методы планирования зачастую предполагают линейные зависимости между изменением параметров и откликом системы, в то время как реальная практика показывает нелинейность и нестабильность таких зависимостей. Традиционные методы календарно-сетевого планирования требуют доработки с учётом вероятностного характера строительных процессов и нелинейности изменений в графике работ. Использование математических моделей, цифровых технологий и систем мониторинга позволяет не только прогнозировать возможные бифуркации, но и адаптировать проектные решения в режиме реального времени, минимизируя риски срыва сроков и перерасхода бюджета. В условиях современных сложных строительных проектов такой подход становится необходимым инструментом эффективного управления.

Бифуркации могут возникать в различных аспектах строительного процесса. Один из наиболее распространённых случаев — это изменение длительности выполнения ключевой работы, которое приводит к тому, что критический путь проекта изменяет свою структуру, включая в себя новые задачи и исключая ранее критичные. Например, если изначально определённая работа выполняется быстрее запланированного, это может привести к сокращению общего срока реализации проекта, но если параллельно выполняемая не критическая задача оказывается задержанной, она может стать критической, изменяя всю сетевую структуру. Это явление усложняется в крупных проектах с большим числом зависимостей между работами, где множество потенциальных критических путей пересекаются и могут динамически изменяться в зависимости от текущего хода строительства.

Для эффективного управления строительными проектами важно не только учитывать наличие критического пути, но и анализировать возможные сценарии его изменения в результате бифуркаций. Это требует применения методов математического

моделирования, позволяющих оценить вероятность появления альтернативных критических путей и их влияние на сроки завершения работ.

Одним из ключевых инструментов в данном процессе является метод Монте-Карло, который позволяет имитировать различные сценарии выполнения проекта, моделируя случайные колебания параметров, таких как продолжительность отдельных работ и доступность ресурсов. Анализируя тысячи возможных вариантов развития событий, можно определить, какие изменения в графике наиболее вероятны и как они повлияют на общий ход строительства.

Кроме того, важным аспектом является анализ временных резервов не только с точки зрения их наличия, но и с учётом их динамических изменений в ходе реализации проекта. В ситуациях, когда изменения параметров ведут к сокращению временных резервов на некритических путях, проект может стать более уязвимым к неожиданным задержкам. Систематический мониторинг этих изменений позволяет своевременно вносить корректировки и разрабатывать стратегии адаптивного управления.

Таким образом, бифуркации в строительных проектах связаны с изменениями во входных параметрах системы, вызывающими скачкообразные изменения критического пути [7, 8]. Выделим наиболее часто встречающиеся в строительных проектах типы бифуркаций:

- Топологическая бифуркация — появление нового критического пути вследствие задержек в работах. В календарно-сетевом планировании строительных проектов представляет собой процесс, при котором вследствие задержек в выполнении отдельных работ происходит перестроение сетевого графа и появление нового критического пути. Это явление особенно опасно, поскольку оно может привести к значительному изменению сроков завершения проекта, увеличению затрат и необходимости срочного перераспределения ресурсов. В отличие от простых сдвигов в графике, топологическая бифуркация характеризуется структурными изменениями в последовательности выполнения задач.

Причиной возникновения топологической бифуркации могут быть различные факторы. Одним из наиболее распространённых является накопление задержек на некритических работах, которые в обычных условиях имели временные резервы, но из-за совокупного сдвига начинают ограничивать общий срок проекта.

- Бифуркация ресурсных ограничений — изменение доступности ресурсов, влияющее на длительность критических работ. Этот тип бифуркаций представляет собой явление, при котором изменение доступности ресурсов приводит к изменению длительности критических работ и, как следствие, может повлиять на общий срок выполнения строительного проекта. В отличие от топологических бифуркаций, связанных с задержками работ, ресурсные бифуркации возникают при изменении доступности материальных, технических или людских ресурсов, что влияет на скорость выполнения задач, входящих в критический путь. Это явление особенно важно в условиях крупных строительных проектов, где ресурсы распределяются между многочисленными параллельными процессами, и любое их отклонение может вызвать каскадные последствия во всём сетевом графе.

- Бифуркация внешних условий. Представляет собой внезапные изменения окружающей среды, которые оказывают значительное влияние на ход выполнения работ, сроки и стоимость реализации проекта. Такие изменения включают колебания экономической ситуации, инфляцию, изменения в законодательстве, погодные условия, задержки поставок и другие факторы, находящиеся вне контроля строительных компаний. Поскольку строительные проекты имеют длительный цикл реализации, внезапные внешние изменения могут привести к серьезным отклонениям от первоначального плана и вынуждают компании адаптироваться к новой реальности, чтобы минимизировать потери. Одним из наиболее значимых факторов, вызывающих бифуркацию внешних условий, является инфляция. Рост цен на строительные материалы, топливо, аренду техники и рабочую силу может привести к удорожанию проекта, превышению бюджета и необходимости корректировки графика работ.

Формально бифуркация в модели сетевого графа описывается изменением множества критических работ:

$$CP(t) = \{i \in V | TP_i = 0\} \quad (5)$$

$$\text{где, } TP_i = PH_i - PH_i \quad (6)$$

где TP_i — временной резерв работы.

При достижении порога бифуркации δ , определяемого производной функции критического пути, происходит скачкообразное изменение состояния проекта:

$$\frac{dCP(t)}{dt} > \delta \Rightarrow \text{бифуркация} \quad (7)$$

Сценарное моделирование позволяет оценить вероятность перехода проекта в зону бифуркации. Для этого строится множество возможных сценариев:

$$T_k = f(p_1^k, p_2^k, \dots, p_n^k), k = 1, \dots, N \quad (8)$$

где p_i^k — случайные вариации параметров.

Так же для решения поставленной задачи эффективным методом является анализ временных резервов работ, который позволяет определить, насколько критический путь устойчив к возможным изменениям. Временные резервы представляют собой разницу между ранними и поздними сроками начала или завершения работы. Если резерв минимален или отсутствует, даже небольшая задержка может привести к бифуркации, изменяя последовательность выполнения работ. Для предотвращения таких ситуаций используются адаптивные методы управления сроками, включающие балансировку загрузки ресурсов и корректировку графика работ в зависимости от текущей ситуации.

Изменение критического пути оценивается через матрицу чувствительности S , элементы которой описывают влияние изменения параметров p_j на длительность проекта T :

$$S_{ij} = \frac{\partial T}{\partial p_j} \quad (9)$$

Высокие значения S_{ij} указывают на возможные бифуркации при изменении параметра p_j .

Таким образом, важным элементом прогнозирования бифуркаций является мониторинг ключевых показателей проекта в реальном времени. Для этого применяются системы сбора и обработки данных, которые позволяют отслеживать статус выполнения работ, динамику использования ресурсов и отклонения от плановых показателей. Регулярный анализ этих данных позволяет выявлять ранние признаки возможных бифуркаций, таких как накопление задержек на некритических работах, перерасход бюджета или нехватка ресурсов.

Для предотвращения возможных бифуркаций целесообразно применение адаптивных методов управления [15, 16].

Адаптивное управление строительными проектами включает:

Резервирование ресурсов:

$$R'_i = R_i + \Delta R \quad (10)$$

где ΔR — страховка от бифуркаций.

Оптимизация критического пути: перераспределение работ для минимизации изменения критического пути.

Автоматическая коррекция сетевого графа: динамическое обновление модели при достижении пороговых значений.

Адаптивное управление можно выразить через функцию стоимости:

$$J = \sum_{i \in CP} C_i \cdot w_i + \lambda \sum_{j \in CP} R_j \quad (11)$$

где w_i — весовая оценка значимости работ, λ — коэффициент штрафа (или весовой коэффициент) за перераспределение ресурсов на некритические работы

Первая сумма $\sum_{i \in \text{CP}} C_i \cdot w_i$ учитывает затраты на работы, входящие в критический путь (CP). Здесь C_i — стоимость работы, а w_i — её вес (значимость в проекте).

Вторая сумма $\lambda \sum_{j \in \overline{\text{CP}}} R_j$ описывает ресурсы, выделяемые на некритические работы ($\overline{\text{CP}}$). λ регулирует баланс между затратами на критический путь и перераспределением ресурсов. Если λ велико, управление фокусируется на снижении перераспределения ресурсов. Если λ мало, можно гибко выделять ресурсы на некритические задачи без серьёзного увеличения стоимости проекта.

4. Заключение

1. Показано, что бифуркации в календарно-сетевом планировании являются неизбежными, особенно при реализации сложных и долгосрочных строительных проектов.

2. Установлено, что комплексное использование подходов, направленных на своевременное прогнозирование бифуркаций в строительных проектах, основывающихся на применении различных методов, включая математическое моделирование, анализ временных резервов и цифровые технологии, позволяет заранее выявлять критические точки, предсказывать возможные изменения в структуре сетевого графа и разрабатывать стратегии адаптивного управления, минимизируя риски задержек и перерасхода бюджета.

3. В условиях высокой динамики строительства эффективное прогнозирование бифуркаций становится ключевым элементом успешного управления проектами и позволяет обеспечивать своевременное и экономически эффективное выполнение работ.

Список литературы / References

1. Гусаков А.А., Веремеенко С.А., Гинзбург А.В. и др. Организационно-технологическая надежность строительства // Москва : SvR-Aргус, 1994. – 472 с.
Gusakov A.A., Veremeenko S.A., Ginzburg A.V. Organizational and technological reliability of construction // Moscow: SvR-Argus, 1994. – 472 p.
2. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем // пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
Saaty T., Kerns K. Analytical planning. Organization of systems // M.: Radio and Communications, 1991. – 224 p.
3. Мищенко В.Я., Емельянов Д.И. Методы решения задач календарного планирования на основе композиционных матрично-сетевых моделей // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – №5 (521). – С. 58–63.
Mishchenko V.Ya., Emelyanov D.I. Methods for solving calendar planning problems based on compositional matrix-network models // News of higher educational institutions. Construction. – 2002. – No. 5 (521). – P. 58–63.
4. Мищенко В.Я., Емельянов Д.И., Тихоненко А.А. Разработка методики оптимизации распределения ресурсов в календарном планировании строительства на основе генетических алгоритмов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №11. – С. 76–78.
Mishchenko V.Ya., Emelyanov D.I., Tikhonenko A.A. Development of a methodology for optimizing resource allocation in construction schedule planning based on genetic algorithms // Industrial and Civil Construction. – 2013. – No. 11. – P. 76–78.
5. Lawrence P. Leach Critical Chain Project Management, Third Edition // Artech House – 2014. – 345 p.
6. Walker A. Project management in construction // Oxford: Blackwell Science, 2002. – 289 p.
7. Bak P. (1996). How nature works: The science of self-organized criticality. Copernicus. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1>
8. Bak P., Tang C., Wiesenfeld, K. Self-organized criticality. // Physical Review A, 38(1), 364–374. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>
9. Липидус 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.

- Lapidus A.A., Faizullin I.E., Mikhhalchenko O.Yu. Method for forming organizational and technical solutions during the construction of permanent construction projects // Construction Production. – 2024. – No. 4. – P. 3-8.
10. 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>
Mikhhalchenko O.Yu., Lapidus A.A., Faizullin I.E. Bifurcation processes in managing the timing and costs of construction projects // Vestnik Evrazijskoj nauki. – 2024. – V. 16. – No. 6.
 11. Зигангирова Л.И., Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Оптимизация технологических решений при устройстве подземного пространства существующих зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1528–1536.
Zigangirova L.I., Galiev I.Kh., Ibragimov R.A., Shakirzyanov F.R. Optimization of engineering solutions used to develop the underground spaces of existing buildings. Bulletin of MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; V. 17. Iss. 11. P. 1528–1536.
 12. Rubinstein R.Y., Kroese D. Simulation and the Monte Carlo method // John Wiley & Sons. – 2011.
 13. 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.
 14. Haken H. (1983) Synergetics. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-88338-5>
 15. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling // Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 624 p.
 16. Ширшиков Б.В., Славин А.М., Степанова В.С., Михеев С.О. и др. Минимизация продолжительности возведения объектов на основе использования информационно–динамических сетевых моделей // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №2. – С. 70–75.
Shirshikov B.V., Slavin A.M., Stepanova V.S., Mikheev S.O., et al. Minimization of construction time based on the use of information-dynamic network models // Industrial and Civil Construction. – 2016. – No. 2. – Pn . 70–75.

Информация об авторах

Олег Юрьевич Михальченко, кандидат технических наук, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия

E-mail: oleg_mik@mail.ru; ORCID 0009-0009-7623-0762

Information about the authors

Oleg Yu. Mikhhalchenko, candidate of technical sciences, associate professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

E-mail: oleg_mik@mail.ru; ORCID 0009-0009-7623-0762