

Моделирование сроков строительства дискретными цепями Маркова

О.Н. Яркова, Н.А. Сидоренко

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Зачастую на практике сроки строительства оцениваются с использованием детерминированных методов и характеристик. Такой подход не отражает реальность, связанную с вероятностной природой рисков и приводит к систематическому занижению сроков и, как следствие, стоимости строительства. В работе предлагается для оценки рисков незавершения строительства в установленные сроки использовать марковскую дискретную неоднородную цепь. Состояниям марковского процесса предложено ставить в соответствие стадии строительства объекта. Вероятности переходов системы предлагается оценивать на основе эмпирических данных по ранее реализованным проектам и/или экспертно с учетом рисков, характеризующих условия строительства. Проведена апробация модели. Предлагаемая модель позволяет оценить сроки завершения строительства, риски незавершения строительства в установленные сроки в планируемых условиях реализации строительства.

Ключевые слова: срок строительства, оценка рисков, марковская модель, дискретная цепь Маркова, неоднородный случайный процесс.

Введение

Строительная отрасль играет значительную роль в современной экономике и социальной сфере. Строительные организации активно развиваются, получают значительные доходы от реализации основного вида деятельности – строительства зданий и сооружений, выступают в роли инвесторов в экономику страны. Однако деятельность строительных организаций подвержена рискам. К примеру, санкционная политика приводит к удорожанию строительных материалов, задержкам и/или отменам поставок, что, в свою очередь, приводит к необходимости искать замену санкционным ресурсам и ведет к срывам сроков строительства и штрафным санкциям, накладываемым уже на самого застройщика. Помимо санкций, на сроки и стоимость строительства могут оказывать влияние и другие факторы риска: неблагоприятные погодные условия, отключения электричества, эпидемии, сказывающиеся на работоспособности рабочей силы и т.д. При этом, зачастую, на практике время и стоимость строительства оцениваются с

использованием детерминированных методов, к примеру на основе сетевого графика плана строительства при детерминированных значениях сроков и стоимости конкретных работ. Такой подход не отражает реальность, связанную с вероятностной природой рисков, и приводит к систематическому занижению затрат на строительство [1].

Вопросам планирования графиков строительства посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Dontsov S.S. [2] в своей работе привел классификацию сетевых моделей и сформулировал рекомендации по рациональному применению их в практике градостроительства для оценки продолжительности отдельных работ. Король С.П. и Король Р.А. [3] провели исследование взаимосвязей между процессами производства, ресурсным обеспечением производства и другими факторами, влияющими на реализацию планов строительства по выбранным критериям. В своих исследованиях авторы [3] опираются на методы календарного планирования, реализованные на основе методов сетевого моделирования. L.A. Oprina [4] провела анализ факторов, влияющих на продолжительность строительства, предложила оценивать сроки строительства с использованием технологий информационного моделирования. Автор предлагает привлекать заказчика к построению сетевых графиков плана строительства для рационального управления проектом строительства [4]. На сегодняшний день научные труды исследователей направлены на оценку рисков проектов строительства, оценку времени и стоимости выполнения проектов строительства в условиях стохастически-изменяющейся внешней среды, что подтверждает актуальность темы работы. Вопросам ресурсного обеспечения строительных процессов с помощью марковских непрерывных цепей посвящена работа С.А. Баркалова [5], предлагаемый подход позволяет оценить риски недостатка ресурсов при строительстве объекта, однако авторы не ставят

целью оценивать сроки строительства. Для оценки времени и стоимости плана строительства в условиях рисков применяют метод вероятностного распределения длительности и стоимости работ проекта строительства на основе сетевого графика [6, 7], метод Монте-Карло [8, 9], также позволяющий моделировать срок и стоимость проекта на основе реализаций распределений ресурсов проекта строительства и сетевого графика, метод сценарного планирования [10] по сетевому графику и другие классические методы оценки рисков, позволяющие на основе сетевого графика оценить риски проектов.

Так, например, в работе В. Indhu, М. Farhan [11] на основе сетевого графика проекта строительства с использованием метода Монте-Карло оцениваются риски незавершенной стадии проекта строительства на основе проведенных исследований завершенной стадии проекта, по итогам оценки авторами предлагаются меры по корректировке незавершенной стадии проекта. В работе С. Болотина [7] предлагается оценивать риски реализации плана строительства на основе вероятностного планирования. Авторы предлагают для каждой дорожной карты реализации плана строительства определить оптимистичный, наиболее вероятный и пессимистичный прогнозы. Затем на основе показателей эффективности инвестиционных проектов осуществить вероятностное прогнозирование сроков реализации проекта строительства. В работе [12] предлагается для оценки рисков реализации плана строительства в установленные сроки использовать метод на основе матриц Эйзенхауэра, с помощью которого авторы предлагают оценивать факторы риска по степени важности, затем оценивать чувствительность критерия «срок строительства» к выявленным факторам риска и вырабатывать решения по управлению риском проекта строительства.

Однако предлагаемые методы предполагают оценку ограниченного количества реализаций плана строительства, фиксированное количество рисков, и зачастую привязаны к одному плановому сетевому графику, что не позволяет в полной мере оценить риски проекта. Предлагаемый в работе подход к оценке рисков невыполнения в срок проекта строительства основан на марковских дискретных моделях, что позволяет не только оценить вероятность реализации проекта в установленные сроки, но и оценить с заданной степенью надежности продолжительность строительства.

Цель и задачи исследования

Цель исследования: разработка математического и программного инструментария для моделирования срока реализации плана строительства объекта в условиях рисков его невыполнения.

Задачи исследования:

- разработка математической модели, описывающей план реализации строительства объекта с учетом рисков невыполнения в срок отдельных этапов строительства;
- разработка программного инструментария для реализации модели плана строительства;
- проведение вычислительного эксперимента.

Методы исследования

Проведем моделирование продолжительности строительства объекта с использованием инструментария Марковских процессов с непрерывным временем и дискретным множеством состояний (непрерывных цепей Маркова).

С точки зрения продолжительности периода строительства объекта, проект строительства может находиться в следующих состояниях:

S_0 – начало строительства, соответствует 0 усл.ед. времени строительства;

S_1 – 1-ая стадия строительства, соответствует 1 усл.ед. времени строительства (готовности строительного объекта);

S_2 – 2-ая стадия строительства, соответствует 2 усл.ед. времени строительства;

и т.д.

S_m – m -ая завершающая стадия строительства, соответствует m усл.ед. времени строительства;

S_{m+1} – строительство завершено.

Здесь m – плановый срок строительства, усл. ед. времени, например день, неделя, месяц, в зависимости от целей моделирования и сроков строительства. При условии возникновения рисков на очередном k -м этапе строительства будем полагать, что система остается на достигнутой ранее k -ой стадии строительства и не переходит на следующую $k+1$ -ю.

Будем считать, что переходы системы из состояния в состояние происходят мгновенно в соответствующие такты времени. Время будем считать дискретным и кратным условным единицам времени, характеризующим стадии строительства. Переходы системы из состояния S_k , $k=0..m$ в другое состояние обусловлены либо переходом на следующую стадию строительства S_{k+1} измеряемую в единицах времени продолжительности строительства в соответствии с планом работ, либо система может остаться в том же состоянии, что обусловлено возможными реализациями рискованных событий, влияющими на ход строительства, например: отсутствие поставок стройматериалов, отсутствие электроэнергии и т.п.; переходы системы в младшее состояния в общем случае могут быть ненулевыми, что может быть обусловлено, например, низким качеством работ и необходимостью исправления выявленных недостатков,

разрушением построенных конструкций в результате чрезвычайных происшествий, пожаров, стихийных бедствий и т.п.. Переход системы в состояние S_{m+1} – «строительство завершено» возможен только из состояния S_m . Состояние S_{m+1} является в контексте реализуемой модели поглощающим и переход из него в другие состояния невозможен.

Так как риски, влияющие на состояние системы, т.е. стадию строительства, могут возникнуть на любом временном этапе, будем полагать, что моделируемая стохастическая система неоднородная, т.е. вероятности переходов состояний системы меняются со временем. В частности, реализация рискованного события на некотором такте времени может привести систему в стадию остановки строительства. Такие события могут быть реализованы путем фиксирования вероятностей перехода системы из состояния i в состояние i равными 1, на некотором в общем случае неограниченном промежутке времени.

Стохастическая система реализации плана строительства описывается матрицей переходных вероятностей для такта времени t вида:

$$P(t) = \begin{pmatrix} p_{0,0}(t) & p_{0,1}(t) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{1,0}(t) & p_{1,1}(t) & p_{1,2}(t) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{2,0}(t) & p_{2,1}(t) & p_{2,2}(t) & p_{2,3}(t) & \dots & 0 & 0 \\ p_{3,0}(t) & p_{3,1}(t) & p_{3,2}(t) & p_{3,3}(t) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m,0}(t) & p_{m,1}(t) & p_{m,2}(t) & p_{m,3}(t) & \dots & p_{m,m}(t) & p_{m,m+1}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы переходных вероятностей состояний системы могут быть оценены на основе статистических данных по ранее реализованным проектам и/или экспертно с учетом возможных рисков, влияющих на различные этапы строительства во времени.

Представленная в таком виде модель плана строительства позволяет определить ряд важных характеристик: вероятность реализации плана

строительства в установленные сроки; вероятность того, что объект будет достроен; среднее время строительства до стадии завершения; безусловные вероятности состояний системы через любой заданный промежуток времени.

Вероятность реализации плана строительства в установленные сроки определена как вероятность того, что система перейдет из состояния S_0 – начало строительства в состояние S_{m+1} – ровно за $m+1$ такт времени $f_{0,m+1}^{(m+1)}$ (в терминах первого достижения состояния S_{m+1} из состояния S_0) и может быть рассчитана по формуле:

$$f_{0,m+1}^{(m+1)} = P_{0,m+1}^{(m+1)} - \sum_{i=1}^m f_{0,m+1}^{(i)} \cdot P_{m+1,m+1}^{(m-i)}, \quad (1)$$

где $f_{i,j}^{(t)}$ – вероятность первого достижения системы состояния S_j при выходе из состояния S_i ровно через t тактов времени; $P_{i,j}^{(t)}$ – вероятность перехода системы из состояния S_i в состояние S_j за t тактов времени, определяется как элементы матрицы $P^{(t)}$ переходных вероятностей за t тактов времени следующим образом:

$$P^{(t)} = \{p_{i,j}^{(t)}\}: P^{(t)} = P(t) * P^{(t-1)}. \quad (2)$$

Вероятность того, что объект когда-нибудь будет достроен, определяется как вероятность того, что выйдя из состояния S_0 в момент времени t , объект когда-нибудь попадет в состояние S_{m+1} :

$$f_{0,m+1} = \sum_{t=1}^{\infty} f_{0,m+1}^{(t)}. \quad (3)$$

Среднее время строительства до стадии завершения определяется при условии, что $f_{0,m+1} = 1$ по формуле:

$$\mu_{0,m+1} = \sum_{t=1}^{\infty} t \cdot f_{0,m+1}^{(t)}. \quad (4)$$

Безусловные вероятности состояний системы через заданный промежуток времени t :

$$\bar{p}_j^{(t)} = \sum_{i=1}^{m+1} \bar{p}_i^{(0)} \cdot p_{ij}^{(t-1)}, j = 0, \dots, m+1, \quad (5)$$

где $\bar{p}^{(0)} = \{\bar{p}_i^{(0)}\}, i = 0, \dots, m+1$ – вектор начального распределения вероятностей, для строительства нового объекта $\bar{p}_0^{(0)} = 1, \bar{p}_i^{(0)} = 0, i = 1, \dots, m+1$.

Вычислительный эксперимент

Для проведения расчетов разработана программа на языке C++. Проведем вычислительный эксперимент.

Рассмотрим пример. Пусть разработан план строительства небольшого загородного дома, срок строительства определен – 8 недель. В качестве условной единицы времени строительства выберем 1 неделю. Описанием состояний модели реализации плана строительства: S_0 – начало строительства, соответствует 0 усл. ед. времени строительства (готовности строительного объекта); S_1 – 1-ая стадия строительства, соответствует 1 усл. ед. времени строительства; S_2 – 2-ая стадия строительства, соответствует 2 усл. ед. времени строительства; и т.д. S_8 – 8-ая завершающая стадия строительства, соответствует 8-ми неделям строительства; S_9 – строительство завершено.

Пусть вероятности переходов оценены экспертно. Второй месяц строительства, начиная с четвертой недели, выпадает на осенние месяцы и возможно ухудшение погодных условий, влияющих на ход строительства. Вероятности переходов состояний системы определены следующим образом:

- для $t=1,2,\dots,4$: $p_{k,k}(t) = 0.15$; $p_{k,k+1}(t)=0.8$; $p_{k,k-1}(t)=0.05$; $p_{k,k-i}(t)=0, k=2,3,\dots,8, i=2,\dots,k$; $p_{0,0}(t)=0.15, p_{0,1}(t)=0.85$;

- для $t=5,6,7,8$ – осенние месяцы: $p_{k,k}(t) = 0.25$; $p_{k,k+1}(t)=0.7$; $p_{k,k-1}(t)=0.05$,
 $p_{k,k-i}(t)=0$, $k=2,3\dots 8$, $i=2,\dots K$; $p_{0,0}(t) = 0.1$; $p_{0,1}(t) = 0$, 9;

- в случае, если за 8-мь недель строительство не будет завершено
 $P(t)=P(8)$, при $t=9, 10\dots 18$ – осенние месяцы.

- для $t = 19,20\dots 32$ – зимние месяцы: $p_{k,k}(t) = 0.4$; $p_{k,k+1}(t)=0.55$;
 $p_{k,k-1}(t)=0.05$, $p_{k,k-i}(t)=0$, $k=2,3\dots 8$, $i=2,\dots k$; $p_{0,0}(t)=0.3$; $p_{0,1}(t)=0.7$;

- для $t = 33,34\dots 46$ – весенние месяцы: $P(t)=P(8)$;

- для $t = 47,48\dots 60$ – летние месяцы: $P(t)=P(4)$.

Расчеты по формулам (3) и (4) проводились до достижения заданной степени точности: $|P_{m+1}(t) - 1| < eps$ либо, при невыполнении приведенного условия сходимости, до заданной предельной величины, когда принимается решение, что строительство не завершится. Для рассматриваемого примера это значение было установлено на значение 60 недель.

Сходимость с точностью 0.0001 была достигнута при $t=37$ недель.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица № 1

Показатели плана строительства

Характеристика	Значение
Вероятность реализации плана строительства в установленные сроки	0.1432
Вероятность того, что объект когда-нибудь будет достроен	1
Среднее время строительства до стадии завершения, недель.	12.8228
Безусловные вероятности состояний системы через заданный промежуток времени $t=m+1$ (планируемый срок завершения строительства)	$P_0=0.0003$; $P_1=0.0019$; $P_2=0.0078$; $P_3=0.0254$; $P_4=0.0655$; $P_5=0.1350$; $P_6=0.2150$; $P_7=0.2553$; $P_8=0.2055$; $P_9=0.0885$

Получено автором в результате вычислительного эксперимента

Расчеты показывают, что риск незавершения проекта в срок достаточно высокий и составляет 85.68%. В целом проект будет завершен, но срок его реализации в среднем будет равен 12.8 недель.

На рис.1 представлены графики изменения значений безусловных вероятностей состояний системы в зависимости от времени.

По графику видно, что с надежностью 95% срок строительства составит 18 недель.

Получено автором в результате вычислительного эксперимента

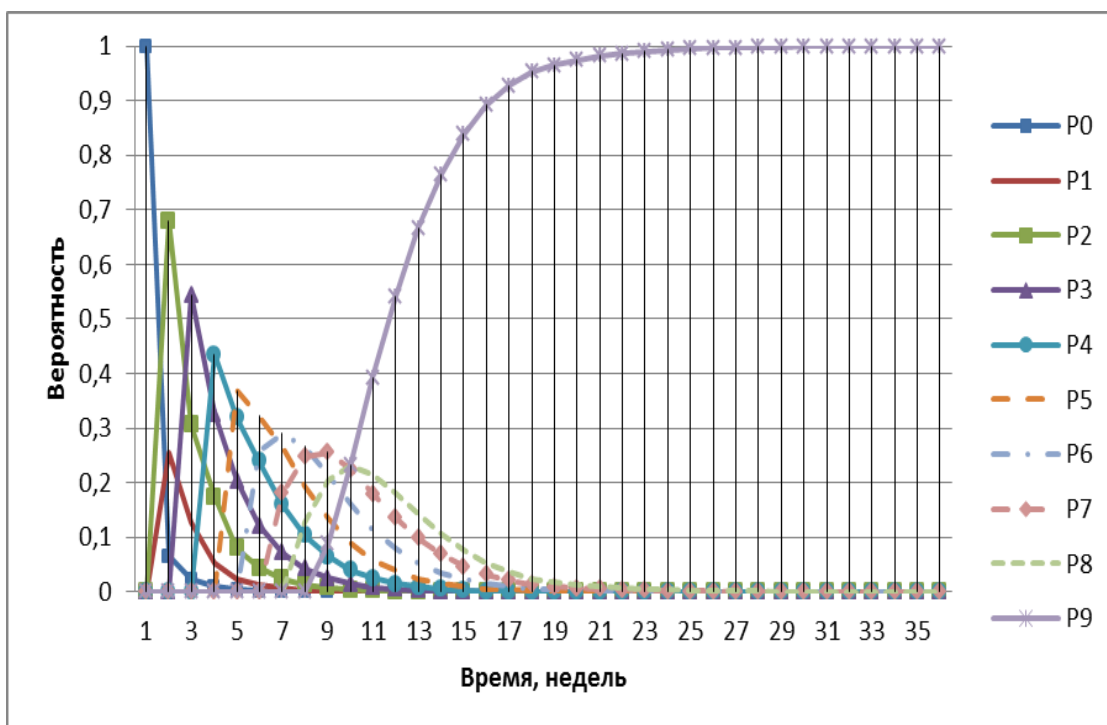


Рис. 1. – Графики изменения значений безусловных вероятностей состояний системы в зависимости от времени

Расчеты показали высокий риск незавершения проекта в установленные сроки, с достаточным уровнем надежности сроки строительства могут составить 18 недель, что более чем в 2 раза превышает планируемый срок строительства.

Заключение

В работе предложено для оценки сроков завершения строительства, рисков незавершения строительства в установленные сроки использовать неоднородную марковскую модель с дискретным множеством состояний и дискретным временем. Вероятности переходов состояний системы могут быть определены на основе статистической информации по ранее реализованным проектам и/или скорректированы экспертно, с учетом возможных рисков в планируемых условиях строительства. В качестве развития метода планируется согласовать предлагаемую марковскую модель с сетевым графиком строительства.

Литература

1. Flyvbjerg B., Glenting C., Rønneft A. Procedures for dealing with optimism bias in transport planning (June 2004). London: The British Department for Transport, Guidance Document, June 2004. URL: papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2278346.
2. Dontsov S.S., Zhetpysbaev S.K., Mazhitova A.E., Sherimova N.M., Salimzanova B.B. Classification of network schedules as part of construction organization projects and works production projects // Вестник Торайгыров университета. Экономическая серия. 2022. №2. С. 35-44. DOI: doi.org/10.48081/DLJR6812.
3. Король С.П., Король Р.А. Алгоритмический подход в сетевом моделировании в строительстве: графические решения и оптимизационные задачи // Жилищные стратегии. 2023. Т.2. № 2. С. 317-332.
4. Oparina L.A. Application of information modelling technologies for construction time management // Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 48-55. DOI: [10.52957/27821919_2021_2_48](https://doi.org/10.52957/27821919_2021_2_48).
5. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. Модель управления запасами в строительной сфере, основанная на марковских случайных



процессах // Инженерный вестник Дона, 2023. №2. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8235.

6. Akpan N.P., Agadaga G.O. Modelling Building Renovation Using PERT // Asian Research Journal of Mathematics. 2020. No 16(4). pp. 25-38. DOI: 10.9734/arjom/2020/v16i430184

7. Bolotin S., Dadar Aldyn-Kys, Biche-Ool Khenzig, Malsagov A. Generating a probabilistic construction schedule // Architecture and engineering. 2020. №4. pp. 44-50.

8. Likhitrungsilp V., Photios G. I. Detailed probabilistic construction estimating by Monte-Carlo simulation // Proceedings: 9th National Convention on Civil Engineering 2004, Phetburi, Thailand, May 19, 2004. DOI: dx.doi.org/10.7302/3733.

9. Mahmoodzadeh A., Zare S. Probabilistic prediction of expected ground condition and construction time and costs in road tunnels // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Is. 5. pp. 734-745. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.07.001.

10. Яркова О.Н., Сидоренко Н.А. О подходе к формированию стратегии управления риском объекта строительства / Сборник докладов третьей Национальной научной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования» – МГСУ, 2023. С. 1026-1032.

11. Indhu B., Farhan M. Analysis of probabilistic times in a construction project using monte carlo simulation technique. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 10. pp. 26463-26474.

12. Христофорова К.А., Демидова В.С., Кривоги́на Д.Н. Управление календарно-сетевыми графиками строительства в условиях нестабильного мира // Инженерный вестник Дона, 2022. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8113.

References

1. Flyvbjerg B., Glenting C., Rønne A. London: The British Department for Transport, Guidance Document, June 2004. URL: papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2278346.
 2. Dontsov S.S., Zhetpysbaev S.K., Mazhitova A.E., Sherimova N.M., Salimzanova B.B. Vestnik Toraygyrov universiteta. Ekonomicheskaya seriya. 2022. № 2. pp. 35-44. DOI: doi.org/10.48081/DLJR6812.
 3. Korol' S.P., Korol' R.A. Zhilishchnye strategii. 2023. Vol. 10. no. 3. pp 317-332.
 4. Oparina L.A. Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 48-55. DOI: [10.52957/27821919_2021_2_48](https://doi.org/10.52957/27821919_2021_2_48).
 5. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Serebryakova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. № 2, 2023. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8235.
 6. Akpan N.P., Agadaga G.O. Asian Research Journal of Mathematics. 2020. no. 16(4). pp. 25-38. DOI: [10.9734/arjom/2020/v16i430184](https://doi.org/10.9734/arjom/2020/v16i430184)
 7. Bolotin S., Dadar Aldyn-Kys, Biche-Ool Khenzig, Malsagov A. Architecture and engineering. 2020. № 4. pp. 44-50.
 8. Likhitrungsilp V., Photios G. I. Proceedings: 9th National Convention on Civil Engineering 2004, Phetburi, Thailand, May 19, 2004. DOI: dx.doi.org/10.7302/3733.
 9. Mahmoodzadeh A., Zare S. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. Is. 5. pp 734-745. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.07.001.
 10. Yarkova O.N., Sidorenko N.A. Sbornik dokladov tret'ey Natsional'noy nauchnoy konferentsii «Aktual'nye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya», MGSU, 2023. pp. 1026-1032.
 11. Indhu B., Farhan M. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 10. pp. 26463-26474.
-



12. Khristoforova K.A., Demidova V.S., Krivogina D.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8113

Дата поступления: 11.12.2023

Дата публикации: 29.01.2024