

Обзор мирового опыта учета случайных организационных ожиданий при календарном планировании строительных проектов

А.В. Алексейцев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

Аннотация: Рассматривается обзор состояния проблемы учета случайных факторов при организации строительства. Проблемы учета случайных факторов в календарном моделировании строительства рассматривались в разных работах. Однако в этих исследованиях не в полной мере уделялось внимание ходу строительства для крупных проектов. Вместе с этим задачи планирования тесно связаны с оптимизацией рабочего времени и распределения ресурсов на строительном производстве. Такие задачи, как правило, решаются путем рассмотрения нескольких вариантов технологической последовательности работ, а типология и вариативность случайных факторов не в полной мере принимаются во внимание. Ряд исследователей имеют точку зрения, что определяющим фактором при оценке действительной продолжительности строительства является надежность поставщиков и доставки строительной продукции. Однако, обеспечить процесс строительного производства в реальности без перерывов в работах не представляется возможным. Основной причиной этого являются случайные факторы. Их учет предлагается осуществлять на основе современных информационных технологий, включающих искусственный интеллект, стохастические подходы, теорию вероятности и математическую статистику.

Ключевые слова: организация строительства, случайные факторы, организационные ожидания, календарное моделирование, стохастический поиск, генетические алгоритмы

Рассмотрим состояние проблемы учета случайных факторов на основе мирового опыта организации производства. В работе [1] рассматривается влияние задержек, связанных с распределением ресурсов в календарном планировании, на стоимость строительства. При этом отмечается, что эти задержки могут существенно увеличивать стоимость работ, в том числе, и не находящихся на критическом пути. Развитием этих исследований является оптимизационная модель [2], где минимизируется стоимость строительства с учетом повторяемости работ и числа перерывов. Такая переменная, как продолжительность строительства, как отмечается в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.], влияет на весь процесс планирования и может существенно изменять эффект от управления.

Получают развитие подходы, основанные на вероятностном анализе эффективности планирования, как это сделано в работе [4] на примере системы технического обслуживания оборудования для снабжения природным газом. При этом вводится понятие риска нежелательных событий, вероятность возникновения которых определяется на основе Байесовой сети. Развитие методов планирования применительно к технологиям информационного моделирования рассматривается в некоторых работах, где, в частности, в статье [5], одновременно учитываются время, ресурсы и пространство планирования. Однако в этой работе некоторых случайных факторов не рассматривается. Одним из практико-ориентированных подходов к календарному планированию является модель, позволяющая пересмотр графика в зависимости от ситуации на стройке [6], в частности от того, какой фактической производительностью обладают машины и бригады строительных рабочих. Однако такая модель может быть недостаточно эффективна, так как не в полной мере учитывает безопасность на стройке.

Рассмотрению безопасности посвящаются некоторые работы, в частности [7]. Здесь, а также во многих других работах повышение безопасности достигается путем внедрения в систему планирования на основе BIM (4D) инструмента по оценке рисков трудовой деятельности. Целый ряд работ учитывает при календарном планировании случайные факторы. Например, в работе [8] обращается внимание на низкую производительность труда, неадекватно настроенное или ломающееся оборудование, а также экстремальные погодные условия. Для определения продолжительности строительства используется имитационная модель. Эти факторы здесь учитываются при планировании стройки со сборными конструкциями.

Большой объем исследований посвящен учету рисков при календарном планировании работ. Так, статья [9] предлагает усовершенствованную систему прогнозирования строительных рисков на основе Байесовой сети, но при отсутствии данных наблюдений в процессе риск-анализа используется метод Монте-Карло. Альтернативой этому подходу является машинное обучение [10]. В исследованиях уделяется внимание также оптимизации планирования с учетом предсказаний задержек строительства [11], в особенности, для крупных инвестиционных проектов. Например, работа [12] включает оптимизацию при планировании строительства повторяющихся проектов по критерию максимизации прибыли инвестора с использованием генетических алгоритмов. Здесь показано, что путем традиционного планирования получение оптимальных вариантов плана затруднительно.

Ряд исследований [13, 14] для оптимизации продолжительности проектов с учетом прерываний в работах используют метаэвристические поисковые стратегии. Это может быть связано с постоянным усложнением объектов, для которых нужно осуществить планирование. Иногда такой процесс является сложной научной и практической задачей. Полезность нечеткой логики при решении такого рода задач показана в обзорной работе [15]. Некоторые исследования рассматривают интеллектуальные системы управления применительно к системам добычи ресурсов и энергопотребления, что может использоваться и для объектов строительства. Эти системы, кроме средств календарного планирования, еще содержат системы прогнозирования рисков, данные о пространственных топологических характеристиках и особенностях эксплуатации технических объектов. Ряд статей, например [16], основан на учете динамической природы процесса строительства и предполагает решать задачи календарного планирования путем многокритериальной оптимизации. При этом рассматриваются такие важные факторы, как наличие рисков [17],

присутствие неопределенности [18], задержек в сроках начала и завершения работ и учет повторяемости процессов в строительных проектах [16].

Исследователями определено около десяти основных причин таких задержек, в том числе, важным является регион расположения объектов. Статья [19] предлагает решения частных задач строительного планирования, в которых важными факторами, влияющими на успех реализации плана, являются логистика в движении ресурсов и надежность поставщиков. С этой проблемой связаны срывы работ при возведении зданий из сборных конструкций [20]. Для ее решения разработаны цифровые модели управления рисками, связанными с низким качеством изготовления узловых соединений, в т.ч. сварки. Следующим важным аспектом в календарном планировании является устойчивость (робастность) плана к изменениям, вызванным случайными факторами [21]. Для повышения этой устойчивости должны реализовываться два принципа: непрерывность движения ресурсов, бесперебойное выполнение работ. Другим подходом к обеспечению устойчивости и надежности календарного плана является статистический контроль производительности труда, а также повышение уровня автоматизации управления строительными процессами. С целью повышения эффективности управления могут использоваться процедуры оптимизации расписания движения транспорта при осуществлении строительных работ или при поставке ресурсов [19]. Одним из перспективных направлений в календарном планировании является реализация методов искусственного интеллекта для управления проектами [22], в частности, могут использоваться алгоритмы машинного обучения для формирования комбинированной базы знаний, содержащей информацию и о строительном объекте, и об условиях в которых он находится. В таких системах важно иметь вычислительный аппарат, основанный на использовании корректных данных о предыдущем опыте строительства [23]. Среди многих работ,

посвященных эффективному управлению и планированию строительства с учетом неопределенностей, можно выделить отдельные исследования, посвященные изучению влияния вредных выбросов от городских строек на экологию застройки [24]; управлению рисками, связанными с климатическими условиями в странах с большим сезонным перепадом температур [25]; системам принятия решений, основанных на видеомониторинге работы и состояния строительных машин [26], и многие другие.

Задачи организации и планирования производства как для нового строительства, так и для реконструкции в настоящее время эффективно решаются, с использованием генетических алгоритмов. Данные алгоритмы решаются как для объектов гражданского строительства, так и для объектов линейной инфраструктуры [27]. При этом, для получения решения по нескольким критериям оптимальности используется сортировка по фронту Парето. В алгоритмах генетического поиска часто используются три основных критерия: время, стоимость и качество проекта, причем в этих работах использованы алгоритмы с недоминирующей сортировкой особей. Ряд других исследований [28] посвящен решению оптимизационных задач поиска варианта планирования при ограниченных ресурсах. Для решения задач многокритериальной оптимизации здесь используется декомпозиция по времени, использование комбинаций генетических алгоритмов других эвристических схем, индивидуальные функции пригодности, формируемые на основе требуемых свойств плана работы. Отдельные задачи, решаемые на основе генетических алгоритмов, посвящены оптимизации распределения ресурсов. Это могут быть человеческие ресурсы, распределяемые с учетом многообъектной и много проектной стройки. Наиболее релевантными исследованиями, соответствующими тематике данной статьи, являются работы [29, 30] где уделено внимание учету рисков и безопасности календарных планов. Эти риски могут быть связаны с задержками поставок,



а также аварийных ситуаций. В этих и подобных исследованиях случайные факторы представлялись детерминированными величинами. В ряде работ [31] организационные ожидания в планировании представлены случайными величинами, заданными наборами дискретных множеств.

Вывод

Современное календарное моделирование при организации работ для строительных проектов учитывает следующие основные случайные факторы:

- риск отказа материально-технических ресурсов, участвующих непосредственно в строительных работах, а также логистических связях;
- риск потери доступности трудовых ресурсов;
- риск наступления форс-мажорных обстоятельств, связанных с погодными условиями, техногенными авариями, внешними вызовами.

При этом, организационные ожидания, связанные перерывами в работах могут представляться как в детерминированном виде, так и множествами случайных величин. Эффективным способом определения сроков и продолжительности строительства в данном случае является применение метаэвристических поисковых схем, в частности, эволюционного моделирования.

Литература

1. Zalmai, M.L., Аксау, С., Manisali, E. Time-cost optimization using harmony search algorithm in construction projects | Optimización del costo del tiempo, utilizando el algoritmo de búsqueda de armonía en proyectos de construcción. Revista de La Construcción. 2019. № 18 (2), pp. 226–237. doi: 10.7764/RDLC.18.2.226
2. Anysz, H. in IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2019. doi: 10.1088/1757-899X/603/3/032004



3. Kermanshachi, S.; Rouhanizadeh, B. Sensitivity analysis of construction schedule performance due to increased change orders and decreased labor productivity. In Proceedings of the Annual Conference—Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, 11-15 June, 2019. URL: csce2019.ca/
4. Leoni, L., BahooToroodi, A., De Carlo, F., Paltrinieri, N. Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019, № 57 pp. 17–24. doi: 10.1016/j.jlp.2018.11.003
5. Francis, A. Chronographical spatiotemporal scheduling optimization for building projects. *Frontiers in Built Environment*. 2019. № 5 . doi: 10.3389/fbuil.2019.00036
6. Nishigaki, S., Saibara, K., Ootsuki, T., Morikawa, H. in Proc. 37th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2020 From Demonstr. to Pract. Use - To New Stage Constr. Robot, 2020, pp. 441–448.
7. Lim, A.W.P., Latief, Y. The development of safety plan using Work Breakdown Structure (WBS) for Building Information Modeling (BIM)-based building structure work. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2020. № 17 (2–3), pp. 1402–1413. doi: 10.1166/jctn.2020.8818
8. Kim, T., Kim, Y.-W., Cho, H. Dynamic production scheduling model under due date uncertainty in precast concrete construction. *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 257 . doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120527
9. Chen, L., Lu, Q., Li, S., He, W., Yang, J. Bayesian Monte Carlo Simulation-Driven Approach for Construction Schedule Risk Inference. *Journal of Management in Engineering*. 2021. № 37 (2). doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000884

10. Hu, Z., Luo, J., Fang, X., Xiao, K., Hu, B., Chen, L. in Proc. - 2021 7th Int. Symp. Syst. Softw. Reliab. ISSSR 2021, pp. 99–108. doi: 10.1109/ISSSR53171.2021.00041

11. Turk, A., Wu, Q., Zhang, M. Model predictive control based real-time scheduling for balancing multiple uncertainties in integrated energy system with power-to-x. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2021. № 130 . doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107015

12. Abdallah, M., Alshahri, A. Optimizing planning of build–operate–transfer projects to maximize investor profit. Canadian Journal of Civil Engineering. 2019. № 46 (1), pp. 26–37. doi: 10.1139/cjce-2017-0327

13. Liu, D., Li, H., Wang, H., Qi, C., Rose, T. Discrete symbiotic organisms search method for solving large-scale time-cost trade-off problem in construction scheduling. Expert Systems with Applications. 2020. № 148 . doi: 10.1016/j.eswa.2020.113230

14. Biruk, S., Jaśkowski, P. Selection of the optimal actions for crashing processes duration to increase the robustness of construction schedules. Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 10 (22), pp. 1–14. doi: 10.3390/app10228028

15. Plebankiewicz, E., Zima, K., Wieczorek, D. Modelling of time, cost and risk of construction with using fuzzy logic. Journal of Civil Engineering and Management. 2021. № 27 (6), pp. 412–426. doi: 10.3846/jcem.2021.15255

16. Sami Ur Rehman, M., Thaheem, M.J., Nasir, A.R., Khan, K.I.A. Project schedule risk management through building information modelling. International Journal of Construction Management. 2020. doi: 10.1080/15623599.2020.1728606

17. Isah, M.A., Kim, B.-S. Integrating schedule risk analysis with multi- skilled resource scheduling to improve resource- constrained project scheduling problems. Applied Sciences (Switzerland). 2021. № 11 (2), pp. 1–16. doi: 10.3390/app11020650

18. García-Nieves, J.D., Ponz-Tienda, J.L., Ospina-Alvarado, A., Bonilla-Palacios, M. Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects. *Automation in Construction*. 2019. № 105 . doi: 10.1016/j.autcon.2019.03.020
 19. Nolz, P.C. Optimizing construction schedules and material deliveries in city logistics: a case study from the building industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2021. № 33 (3), pp. 846–878. doi: 10.1007/s10696-020-09391-7
 20. Chang, H.-Y., Chiu, C.-K. Uncertainty assessment of field weld connections and the related effects on service life of steel buildings. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2019. № 15 (10), pp. 1333–1345. doi: 10.1080/15732479.2019.1621906
 21. Jaśkowski, P., Biruk, S., Krzemiński, M. Planning repetitive construction processes to improve robustness of schedules in risk environment. Metoda harmonogramowanie powtarzalnych procesów budowlanych zwiększająca odporność harmonogramów w warunkach ryzyka. *Archives of Civil Engineering*. 2020. № 66 (3), pp. 643–657. doi: 10.24425/ace.2020.134418
 22. Petrochenko, M.V., Velichkin, V.Z., Kazakov, Y.N., Zavodnova, Y.B. Reliability assessment of the construction schedule by the critical chain method. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 81(5). Pp. 25–31. doi: 10.18720/MCE.81.3.
 23. Alvanchi, A., Rahimi, M., Mousavi, M., Alikhani, H. Construction schedule, an influential factor on air pollution in urban infrastructure projects. *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 255. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120222
 24. Liu, B., Pan, Z., Tan, Z., Wang, D., Yu, T. in 8th Annu. IEEE Int. Conf. Cyber Technol. Autom. Control Intell. Syst. CYBER 2018, pp. 1160–1165. doi: 10.1109/CYBER.2018.8688142
-

25. Senthil, J., Muthukannan, M., Robin Sham, S.H. Prediction of climate risk management in infrastructure projects. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. № 8 (11 Special), pp. 268–272. doi: 10.35940/ijitee.K1041.09811S219
26. Xiao, B., Kang, S.-C. in Proc. 36th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2019, pp. 1136–1141.
27. Wei H., Li W., and Wang W. “Developing a Resource Allocation Approach for Resource-Constrained Construction Operation under Multi-Objective Operation.” *Sustainability (Switzerland)* 2021. №13. URL: doi.org/10.3390/su13137318.
28. Abhilasha P., Jha K.N. “Integrating Quality and Safety in Construction Scheduling Time-Cost Trade-Off Model.” *Journal of Construction Engineering and Management*. 2021. № 147 (2). URL: doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001979.
29. Xie, F., H. Li, and Z. Xu. “Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling with Uncertain Activity Cost.” *Expert Systems with Applications* 2021 168. URL: doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114475.
30. Qin, M. “Evolution of Labor Relations in the Development of Human Resources Based on Improved Genetic Algorithm.” *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2022. URL: doi.org/10.1142/S0218126622502723.
31. Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Галкин С.С. Методика определения продолжительности строительства на основе эволюционного моделирования с учетом случайных организационных ожиданий *Вестник МГСУ*. 2016. № 10. С. 120-130.

References

1. Zalmai, M.L., Аксау, С., Manisali, E. *Revista de La Construcción*. 2019. № 18 (2), pp. 226–237. doi: 10.7764/RDLC.18.2.226
-

2. Anysz, H. in IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2019. doi: 10.1088/1757-899X/603/3/032004
 3. Kermanshachi, S., Rouhanizadeh, B. in Proceedings, Annu. Conf. - Can. Soc. Civ. Eng (2019). URL: csce2019.ca/
 4. Leoni, L., BahooToroody, A., De Carlo, F., Paltrinieri, N. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019, № 57 pp. 17–24. doi: 10.1016/j.jlp.2018.11.003
 5. Francis, A. Frontiers in Built Environment. 2019. № 5 . doi: 10.3389/fbuil.2019.00036
 6. Nishigaki, S., Saibara, K., Ootsuki, T., Morikawa, H. in Proc. 37th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2020 From Demonstr. to Pract. Use - To New Stage Constr. Robot, 2020, pp. 441–448.
 7. Lim, A.W.P., Latief, Y. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2020. № 17 (2–3), pp. 1402–1413. doi: 10.1166/jctn.2020.8818
 8. Kim, T., Kim, Y.-W., Cho, H. Journal of Cleaner Production. 2020. № 257 . doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120527
 9. Chen, L., Lu, Q., Li, S., He, W., Yang, J. Journal of Management in Engineering. 2021. № 37 (2). doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000884
 10. Hu, Z., Luo, J., Fang, X., Xiao, K., Hu, B., Chen, L. in Proc. - 2021 7th Int. Symp. Syst. Softw. Reliab. ISSSR 2021, pp. 99–108. doi: 10.1109/ISSSR53171.2021.00041
 11. Turk, A., Wu, Q., Zhang, M. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2021. № 130. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107015
 12. Abdallah, M., Alshahri, A. Canadian Journal of Civil Engineering. 2019. № 46 (1), pp. 26–37. doi: 10.1139/cjce-2017-0327
 13. Liu, D., Li, H., Wang, H., Qi, C., Rose, T. Expert Systems with Applications. 2020. № 148. doi: 10.1016/j.eswa.2020.113230
-



14. Biruk, S., Jaśkowski, P. Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 10 (22), pp. 1–14. doi: 10.3390/app10228028
 15. Plebankiewicz, E., Zima, K., Wieczorek, D. Journal of Civil Engineering and Management. 2021. № 27 (6), pp. 412–426. doi: 10.3846/jcem.2021.15255
 16. Sami Ur Rehman, M., Thaheem, M.J., Nasir, A.R., Khan, K.I.A. 2020. doi: 10.1080/15623599.2020.1728606
 17. Isah, M.A., Kim, B.-S. Applied Sciences (Switzerland). 2021. № 11 (2), pp. 1–16. doi: 10.3390/app11020650
 18. García-Nieves, J.D., Ponz-Tienda, J.L., Ospina-Alvarado, A., Bonilla-Palacios, M. Automation in Construction. 2019. № 105. doi: 10.1016/j.autcon.2019.03.020
 19. Nolz, P.C. Flexible Services and Manufacturing Journal. 2021. № 33 (3), pp. 846–878. doi: 10.1007/s10696-020-09391-7
 20. Chang, H.-Y., Chiu, C.-K. Structure and Infrastructure Engineering. 2019. № 15 (10), pp. 1333–1345. doi: 10.1080/15732479.2019.1621906
 21. Jaśkowski, P., Biruk, S., Krzemiński, M. Archives of Civil Engineering. 2020. № 66 (3), pp. 643–657. doi: 10.24425/ace.2020.134418
 22. Petrochenko, M.V., Velichkin, V.Z., Kazakov, Y.N., Zavodnova, Y.B. Magazine of Civil Engineering. 2018. № 81(5). Pp. 25–31. doi: 10.18720/MCE.81.3.
 23. Alvanchi, A., Rahimi, M., Mousavi, M., Alikhani, H. Journal of Cleaner Production. 2020. № 255. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120222
 24. Liu, B., Pan, Z., Tan, Z., Wang, D., Yu, T. in 8th Annu. IEEE Int. Conf. Cyber Technol. Autom. Control Intell. Syst. CYBER 2018, pp. 1160–1165. doi: 10.1109/CYBER.2018.8688142
-



25. Senthil, J., Muthukannan, M., Robin Sham, S.H. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. № 8 (11 Special), pp. 268–272. doi: 10.35940/ijitee.K1041.09811S219
26. Xiao, B., Kang, S.-C. in Proc. 36th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2019, pp. 1136–1141.
27. Wei H., , Li W., and Wang W. Sustainability (Switzerland) 2021. №13. URL: doi.org/10.3390/su13137318.
28. Abhilasha P., Jha K.N. Journal of Construction Engineering and Management. 2021. № 147 (2). URL: doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001979.
29. Xie, F., H. Li, and Z. Xu. Expert Systems with Applications 2021 168. URL: doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114475.
30. Qin, M. Journal of Circuits, Systems and Computers. 2022. URL: doi.org/10.1142/S0218126622502723.
31. Kurchenko N.S. Alekseytsev A.V., Galkin S.S. Vestnik MGSU issue 10 pp. 120-130.