УДК 004.85
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-697-709
EDN WBJYYP

Метод прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий на основе нечеткого логического вывода

[1] Еремин Д.В., [1] Польщиков К.А., [2] Маматов А.В.
[1] Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
[2] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46
eremdmitry@mail.ru, polshchikov@bsuedu.ru, it@bstu.ru

Аннотация. Целью представленного в статье исследования является совершенствование автоматизированных средств планирования капитальных ремонтов зданий на основе разработки метода прогнозирования продолжительности выполняемых работ. Предложенный метод основан на применении нечеткого логического вывода для оценивания коэффициента корректировки продолжительности выполнения работы относительно нормативного значения. Настройка параметров нечеткого вывода осуществляется с помощью нейронной сети, обучение которой производится с применением ретроспективных данных о результатах выполнения аналогичных работ с участием конкретных исполнителей и использованием определенных наименований материалов. Представлены результаты вычислительных экспериментов, которые показали работоспособность предложенного метода и целесообразность его применения на практике.

Ключевые слова: автоматизация планирования капитального ремонта зданий, сетевой график, метод оценки и анализа программ, нечеткие множества, нечеткий логический вывод, нейронная сеть, продолжительность работ

Для цитирования: Еремин Д.В, Польщиков К.А., Маматов А.В. 2025. Метод прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий на основе нечеткого логического вывода. *Экономика. Информатика*, 52(3): 697–709. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-697-709. EDN WBJYYP

Method for Predicting the Duration of Major Repairs of Buildings Based on Fuzzy Logical Inference

[1] Dmitry V. Eremin, **[1]Konstantin A. Polshchikov, [2]Aleksandr V. Mamatov**
[1] Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia
[2] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia
eremdmitry@mail.ru, polshchikov@bsuedu.ru, it@bstu.ru

Abstract. The article presents a solution to an urgent scientific and technical problem consisting in developing a method for forecasting the duration of major repairs of buildings. The proposed method is based on the use of fuzzy logical inference to estimate the coefficient of adjustment of the duration of work relative to the standard value. The input variables are the indicators of the most important factors affecting the duration of a specific job. These include the qualifications of the performers, the quality of the materials used, and the complexity of the conditions for performing the work. To adjust the parameters of fuzzy inference, an ANFIS model is used. To train it, a sample is compiled, taking into consideration the retrospective results of work with the participation of certain performers and the use of certain names of materials. Numerous computational

© Еремин Д.В, Польщиков К.А., Маматов А.В., 2025

experiments have confirmed the expediency and practicabilty of the proposed method. The results obtained can be used in further research on the construction of an automated system for planning major repairs of buildings and the development of appropriate software.

Keywords: automation of planning of buildings capital repairs, network schedule, program evaluation and review technique, fuzzy sets, fuzzy logical inference, neural network, work duration

For citation: Eremin D.V., Polshchikov K.A., Mamatov A.V. 2025. Method for Predicting the Duration of Major Repairs of Buildings Based on Fuzzy Logical Inference. *Economics. Information technologies*, 52(3): 697–709 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-3-697-709. EDN WBJYYP

Введение

Восстановление ресурса здания обеспечивается с помощью капитального ремонта, эффективность проведения которого достигается, в первую очередь, на основе рациональной организации необходимых работ. Наибольшее распространение при организации работ получило сетевое планирование методом оценки и анализа программ (Program Evaluation and Review Technique, PERT). Этот метод, в частности, применяется при планировании строительных работ [Andiyan et al., 2021; Deng, Jian, 2022; Aliahmad, et al., 2024; Zaneldin, Ahmed, 2024], ремонтных работ дорожного покрытия [Farida, Anenda, 2022], распределении ресурсов промышленных и добывающих предприятий [Chang et al., 2021; Desticioğlu, 2022; Silva et al., 2022; Haekal, Masood, 2023]. Метод PERT дает возможность спланировать капитальный ремонт и реконструкцию зданий [Топчий и др., 2022; Putra et al., 2024], а также решить многие другие задачи [Aulia, Cipta, 2023; Tam et al., 2023; Aliyu, 2024; Hudda et al., 2025]. Однако при его использовании недостаточно проработанными остаются вопросы обоснования используемых значений продолжительности выполнения тех или иных работ.

Предложена методика сетевого планирования капитального ремонта зданий на основе нечетких множеств, в которой значения времени всех этапов выдаются в виде нечетких значений [Ершов, Топчий, 2021]. Использование полученных в таком виде результатов для дальнейшего планирования зависит от склонности к риску лиц, принимающих решения. В целях минимизации влияния этой субъективной составляющей на процесс планирования требуется совершенствование имеющихся научно-технологических средств оценивания продолжительности работ капитального ремонта зданий, что определяет актуальность темы данной статьи.

Предлагаемый метод

Ключевое значение при планировании капитального ремонта жилых зданий имеет учет продолжительности выполнения конкретных работ. При вычислении времени, необходимого для проведения всего планируемого комплекса работ, как правило, используются нормативные значения продолжительности выполнения отдельных работ. Опыт показывает, что в зависимости от ряда факторов реальная продолжительность работы, выполняемой при проведении капитального ремонта жилых зданий, может существенно отличаться от её нормативной продолжительности. Обладая информацией о реальной продолжительности работ, можно оптимизировать выполнение капитального ремонта, перераспределив исполнительские и материальные ресурсы таким образом, чтобы добиться сокращения времени проведения всего планируемого комплекса работ.

Введем величину коэффициента корректировки продолжительности выполнения работы:

$$K = \frac{Act}{St}, \quad (1)$$

где Act – реальная продолжительность работы капитального ремонта здания; St – нормативная продолжительность работы капитального ремонта здания.

Значение K является неотрицательным, с помощью него можно соотнести величины реальной и нормативной продолжительности той или иной работы: $Act = St$, если $K = 1$; $Act > St$, если $K > 1$; $Act < St$, если $0 < K < 1$.

Исследования показали, что в наибольшей степени на величину K влияют следующие факторы: INQ – квалификация исполнителей работы, INM – качество материалов, используемых при выполнении работы, INC – сложность (нестандартность) условий выполнения работы. Чтобы учесть влияние вышеуказанных факторов на реальную продолжительность выполнения работы, можно применить аппарат нечеткого логического вывода. Обоснованность такого решения обусловлена тем, что влияние данных факторов на величину Act сложно представить в виде определенных численных значений. В таких случаях целесообразно использовать нечеткие множества, к которым в той или иной степени могут быть отнесены факторы INQ, INM и INC, выступающие в качестве входных переменных нечеткого логического вывода.

Для входной переменной INQ предлагается использовать три нечетких множества: «высокая квалификация исполнителей», «средняя квалификация исполнителей» и «квалификация исполнителей ниже средней». Входная переменная INE в определенной степени может принадлежать также трем нечетким множествам: «высокое качество материалов», «среднее качество материалов» и «качество материалов ниже среднего». Для третьей входной переменной INC предлагается использовать два нечетких множества: «высокая сложность условий» и «стандартная сложность условий».

В качестве выходной переменной нечеткого логического вывода предлагается использовать величину K. Зависимость выходной переменной от входных представляется в виде набора (базы) нечетких правил, формирование которых определяется используемым алгоритмом нечеткого вывода. Одним из наиболее простых и распространенных алгоритмов нечеткого вывода является алгоритм Сугено нулевого порядка. Он успешно применяется для решения многих прикладных задач [Польщиков и др., 2019; Польщиков и др., 2020; Махди и др., 2022; Polshchykov et al., 2022]. Использование этого алгоритма дает возможность представить базу нечетких правил в следующем виде:

$$if\ (INQ = QH)\ and\ (INE = EH)\ and\ (INC = CS)\ then\ (K = Kout_1), \quad (2)$$

$$if\ (INQ = QH)\ and\ (INE = EH)\ and\ (INC = CH)\ then\ (K = Kout_2), \quad (3)$$

…

$$if\ (INQ = QB)\ and\ (INE = EB)\ and\ (INC = CH)\ then\ (K = Kout_{18}), \quad (4)$$

где QH, QA и QB – нечеткие множества «высокая…», «средняя…» и «ниже средней квалификация исполнителей» соответственно; EH, EA и EB – нечеткие множества «высокое…», «среднее…» и «ниже среднего качество материалов» соответственно; CH и CS – нечеткие множества «высокая…» и «стандартная сложность условий» соответственно; $Kout_1$, $Kout_2$, …, $Kout_{18}$ – значения индивидуальных выводов нечетких правил.

Степень отнесения входных величин к нечетким множествам определяется соответствующей функцией принадлежности. При формализации оценивания продолжительности выполнения работ капитального ремонта зданий обосновано использование П-образной функции принадлежности [Топчий и др., 2022], а также её усеченных вариантов в виде z- и s-образных сплайн-функций. Реализация нечеткого логического вывода в соответствии с алгоритмом Сугено нулевого порядка предполагает последовательное выполнение процедур фаззификации, агрегирования и дефаззификации. Выполнение процедуры фаззификации дает возможность оценить значения функций принадлежности входных переменных тому или иному нечеткому множеству:

$$QH(INQ)=\begin{cases}1,\ INQ\le INQHa;\\ 1-2\left(\dfrac{INQ-INQHa}{INQHb-INQHa}\right)^2,\ INQHa<INQ\le\dfrac{INQHa+INQHb}{2};\\ 2\left(\dfrac{INQHb-INQ}{INQHb-INQHa}\right)^2,\ \dfrac{INQHa+INQHb}{2}<INQ<INQHb;\\ 0,\ INQHb\le INQ;\end{cases}\tag{5}$$

$$QA(INQ)=\begin{cases}0,\ INQ\le INQAa;\\ 2\left(\dfrac{INQ-INQAa}{INQAb-INQAa}\right)^2,\ INQAa<INQ\le\dfrac{INQAa+INQAb}{2};\\ 1-2\left(\dfrac{INQAb-INQ}{INQAb-INQAa}\right)^2,\ \dfrac{INQAa+INQAb}{2}<INQ\le INQAb;\\ 1,\ INQAb<INQ\le INQAc;\\ 1-2\left(\dfrac{INQ-INQAc}{INQAd-INQAc}\right)^2,\ INQAc<INQ\le\dfrac{INQAc+INQAd}{2};\\ 2\left(\dfrac{INQAd-INQ}{INQAd-INQAc}\right)^2,\ \dfrac{INQAc+INQAd}{2}<INQ<INQAd;\\ 0,\ INQAd\le INQ;\end{cases}\tag{6}$$

$$QB(INQ)=\begin{cases}0,\ INQ\le INQBa;\\ 2\left(\dfrac{INQ-INQBa}{INQBb-INQBa}\right)^2,\ INQBa<INQ\le\dfrac{INQBa+INQBb}{2};\\ 1-2\left(\dfrac{INQBb-INQ}{INQBb-INQBa}\right)^2,\ \dfrac{INQBa+INQBb}{2}<INQ<INQBb;\\ 1,\ INQBb\le INQ;\end{cases}\tag{7}$$

где $QH(INQ)$, $QA(INQ)$ и $QB(INQ)$ – значения функции принадлежности входной переменной INQ нечетким множествам «высокая…», «средняя…» и «ниже средней квалификация исполнителей» соответственно; $INQHa$, $INQHb$, $INQAa$, $INQAb$, $INQAc$, $INQAd$, $INQBa$ и $INQBb$ – характерные значения аргумента функций принадлежности входной переменной INQ нечетким множествам. Аналогичным образом вычисляются значения функций принадлежности двух других входных переменных.

Выполнение процедуры агрегирования дает возможность оценить степень истинности условий нечетких правил:

$$Z_1=QH(INQ)\wedge EH(INE)\wedge CH(INC),\tag{8}$$

$$Z_2=QH(INQ)\wedge EH(INE)\wedge CS(INC),\tag{9}$$

…

$$Z_{18}=QB(INQ)\wedge EB(INM)\wedge CS(INC).\tag{10}$$

С помощью процедуры дефаззификации оценивается искомое значение показателя K:

$$K = \frac{\sum_{k=1}^{18} Z_k Kout_k}{\sum_{k=1}^{18} Z_k}. \quad (11)$$

Для оценивания значений функций принадлежности входных переменных и индивидуальных выводов нечетких правил предлагается применить нейросетевую настройку параметров нечеткого логического вывода с использованием модели нечеткой нейронной сети (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS). Настройка параметров ANFIS-модели осуществляется с использованием обучающей выборки, которую можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Фрагмент обучающей выборки для настройки ANFIS-модели
Fragment of the training sample for tuning the ANFIS model

Значения первой входной переменной	Значения второй входной переменной	Значения третьей входной переменной	Значения выходной переменной
INQ_1	INE_1	INC_1	K_1
INQ_2	INE_2	INC_2	K_2
INQ_3	INE_3	INC_3	K_3
…	…	…	…
INQ_m	INE_m	INC_m	K_m
…	…	…	…

Нижние индексы элементов табл. 1 обозначают номера капитальных ремонтов зданий, проведенных ранее. Значения выходной переменной вычисляются по формуле (1) с использованием значений нормативной и реальной длительности выполнения работы, зафиксированных при проведении соответствующих капитальных ремонтов. Для оценивания значений входных переменных необходимо создание и пополнение базы данных, содержащей следующие позиции:

1) данные об участии каждого исполнителя в работах, выполненных при проведении капитальных ремонтов зданий;

2) данные о материалах, которые были использованы при проведении капитальных ремонтов зданий;

3) данные о сложности условий, в которых были проведены капитальные ремонты зданий;

4) данные о результатах выполнения каждой работы при проведении капитальных ремонтов зданий с позиции соотношения её реальной и нормативной продолжительности.

Квалификация исполнителей работы оценивается с помощью выражения:

$$INQ = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=jm(i)-J}^{jm(i)} Q_{ij}, \quad (12)$$

где I – число исполнителей, привлеченных для выполнения работы в ходе капитального ремонта здания; J – число учитываемых результатов выполнения работы; i – номер исполнителя, привлеченного для выполнения работы в ходе капитального ремонта здания; j – номер результата выполнения работы; $jm(i)$ – максимальный номер результата выполнения работы исполнителем номер i; Q_{ij} – j-й результат выполнения работы исполнителем номер i.

Значения величины Q_{ij} определяются по формуле:

$$Q_{ij} = \begin{cases} 2, & Act_j < St_j; \\ 1, & Act_j = St_j; \\ 0, & Act_j > St_j. \end{cases} \quad (13)$$

Из формулы (13) видно, что наиболее высокими считаются результаты выполнения работы при проведении тех капитальных ремонтов, когда реальная продолжительность этой работы была меньше, чем её нормативная продолжительность. Качество материалов, используемых при выполнении работы, оценивается с помощью выражения:

$$INE = \frac{1}{N \cdot L} \sum_{n=1}^{N} \sum_{l=lm(n)-L}^{lm(n)} E_{nl}, \quad (14)$$

где N – число наименований материалов, использованных для выполнения работы при проведении капитального ремонта здания; L – число учитываемых результатов использования материалов для выполнения работы; n – номер наименования материала, использованного для выполнения работы при проведении капитального ремонта здания; l – номер результата использования материала при выполнении работы; $lm(n)$ – максимальный номер результата использования наименования материала номер n при выполнении работы; E_{nl} – l-й результат использования наименования материала номер n при выполнении работы.

Значения величины E_{nl} определяются по формуле:

$$E_{nl} = \begin{cases} 2, & Act_l < St_l; \\ 1, & Act_l = St_l; \\ 0, & Act_l > St_l. \end{cases} \quad (15)$$

Сложность условий выполнения работы принимает значение 1, если условия стандартные, и значение 0, если условия являются сложными (нестандартными).

Таким образом, для прогнозирования реальной продолжительности работы, которая будет выполнена при проведении планируемого капитального ремонта здания, предложен метод, включающий следующие основные этапы:

1) оценивание квалификации привлекаемых исполнителей, качества используемых материалов и сложности условий выполнения работы как входных переменных нечеткого логического вывода;

2) оценивание коэффициента корректировки реальной продолжительности выполнения работы на основе выполнения процедур фаззификации, агрегирования и дефаззификации;

3) вычисление прогнозируемой продолжительности выполнения работы с использованием данных о её нормативной продолжительности и коэффициента корректировки.

Реализация предложенного метода требует создания, пополнения и использования базы данных, содержащей сведения о результатах участия конкретных исполнителей и применения материалов в работах, выполненных при проведении капитальных ремонтов зданий. В целях исследования работоспособности предложенного метода и целесообразности его применения на практике проведены вычислительные эксперименты, результаты которых представлены ниже.

Вычислительные эксперименты

Предложенный метод прогнозирования реальной продолжительности работ был применен при проведении вычислительных экспериментов по планированию капитального ремонта зданий. В качестве примера в табл. 2 представлены данные, используемые для планирования капитального ремонта здания.

Таблица 2
Table 2

Данные, используемые при планировании капитального ремонта здания
Data used in planning major repairs of the building

Код работы	Наименование работы	Число исполнителей	Объем работ, чел.-смен	Продолжительность выполнения работ, дней	Тариф оплаты труда 1 чел.-смены, тыс. руб.	Коэффициент увеличения фонда оплаты труда	Фонд оплаты труда, тыс. руб.
1-2	Замена окон	15	270	18	3,4	1	918
1-3	Ремонт (замена) системы электроснабжения	12	240	20	3,6	1	864
1-4	Ремонт (замена) системы отопления	15	270	18	3,4	1	918
1-5	Ремонт крыши	9	288	32	3,5	1	1008
1-6	Ремонт (замена) системы водоснабжения	8	288	36	3,5	1	1008
5-8	Утепление стен	15	330	22	3,6	1	1188
6-7	Ремонт (замена) системы канализации	6	144	24	3,75	1	540
7-9	Внутренняя отделка	10	140	14	3,6	1	504
8-9	Внешняя отделка	10	100	10	3,6	1	360
Суммарный фонд оплаты труда, тыс. руб.							7308
Затраты на закупку материалов, тыс. руб.							7684
Выделено средств на оплату труда и закупку материалов, тыс. руб.							16000
Суммарные затраты на оплату труда и закупку материалов, тыс. руб.							14664
Остаток средств, тыс. руб.							1008

В первом столбце табл. 2 представлены коды работ. Каждый из этих кодов содержит номер события, являющегося началом выполнения работы, и номер события, которое наступает, когда эта работа завершается. Наименования работ содержатся во втором столбце данной таблицы. Каждая работа имеет определенный объём, который измеряется в человеко-сменах и содержится в третьем столбце указанной таблицы. В четвертом столбце таблицы обозначены данные о том, сколько дней будет продолжаться выполнение каждой работы. Эта величина зависит от объема работы, числа её исполнителей и режима труда. Тариф оплаты за выполнение конкретной работы в объеме 1 человеко-смены указан в пятом столбце. В шестом столбце содержатся значения коэффициента увеличения фонда оплаты труда, выделяемого на выполнение работы, которые зависят от режима труда. Все указанные коэффициенты в таблице 2 равны 1. Это означает, что все работы будут выполняться в обычном режиме (1 смена, т. е. 8 часов, в день). Если для выполнения какой-либо работы будет установлен более интенсивный режим, то значение соответствующего коэффициента будет превышать 1. Для стимулирования исполнителей трудиться в интенсивном режиме устанавливается двойной тариф оплаты за дополнительные часы работы. Так, если для выполнения работы установлен режим 1,5 смены в день, т. е. после обычных 8 часов труда исполнители продолжают работать ещё 4 часа, то коэффициент увеличения оплаты труда будет равен 2. Следуя этой логике рассуждений, если установлен режим 1,25 смены в день, то значение указанного коэффициента составит 1,5. Последний, шестой, столбец содержит значения фонда оплаты труда, вычисляемого как произведение объема работы, тарифа оплаты труда и коэффициента увеличения фонда оплаты труда.

Рассмотрим в качестве примера работу «Утепление стен», имеющую код 5–8. Началом выполнения этой работы является событие номер 5, а завершением – событие номер 8. Другими словами, работа с кодом 5–8 является выходящей по отношению к событию номер 5 и входящей для события номер 8.

В соответствии с методикой сетевого планирования каждое событие, связанное с выполнением работ, может быть графически представлено в виде, показанном на рис. 1.

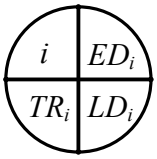

Рис. 1 Обозначения событий
Fig. 1. Event Designations

Значением i обозначен порядковый номер события. Величина ED_i является ранним сроком наступления события номер i, который вычисляется по формуле:

$$ED_i = \max\left\{ED_k + WC_{ki}\right\}, \tag{16}$$

где ED_k – ранний срок наступления события номер k, с которым событие номер i связано входящей работой с кодом k-i; WC_{ki} – продолжительность выполнения работы с кодом k-i. Ранний срок наступления первого события равен 0.

Величина LD_i является поздним сроком наступления события номер i. Значение этой величины вычисляется по формуле:

$$ED_i = \max\left\{ED_k + WC_{ki}\right\}, \tag{17}$$

где LD_j – поздний срок наступления события номер j, с которым событие номер i связано выходящей работой с кодом i-j; WC_{ij} – продолжительность выполнения работы с кодом i-j. Поздний срок наступления заключительного события всегда равен раннему сроку наступления заключительного события.

Величина TR_i является резервом времени наступления события номер i. Значение этой величины вычисляется по формуле:

$$TR_i = LD_i - ED_i. \tag{18}$$

Начальный вид полученного сетевого графика показан на рис. 2. Здесь каждая работа показана в виде стрелки, соединяющей непосредственно связанные с ней события. Число, относящееся к той или иной работе, соответствует продолжительности её выполнения (в данном случае используется нормативная продолжительность, измеряемая в днях). Работы, показанные пунктирной стрелкой, являются фиктивными. Такие работы имеют нулевую продолжительность и фактически не требуют выполнения. Они служат для учета технологической последовательности выполнения работ. Так, например, фиктивная работа, соединяющая событие номер 2 с событием номер 7, показывает, что выполнение работы «Внутренняя отделка» (код 7–9) нельзя начинать раньше, чем будет выполнена работа «Замена окон» (код 1–2).

Время, требуемое для проведения всего комплекса работ капитального ремонта, определяется с помощью критического пути. В состав критического пути входят работы, соединяющие события с нулевым резервом времени. В рассматриваемом случае нулевой резерв времени имеют события с номерами 1, 6, 7 и 9, значит, критический путь включает работы с кодами 1–6, 6–7 и 7–9. Суммарная продолжительность выполнения этих работ составляет 72 дня, т. е. именно столько потребуется времени для проведения всего планируемого капитального ремонта здания.

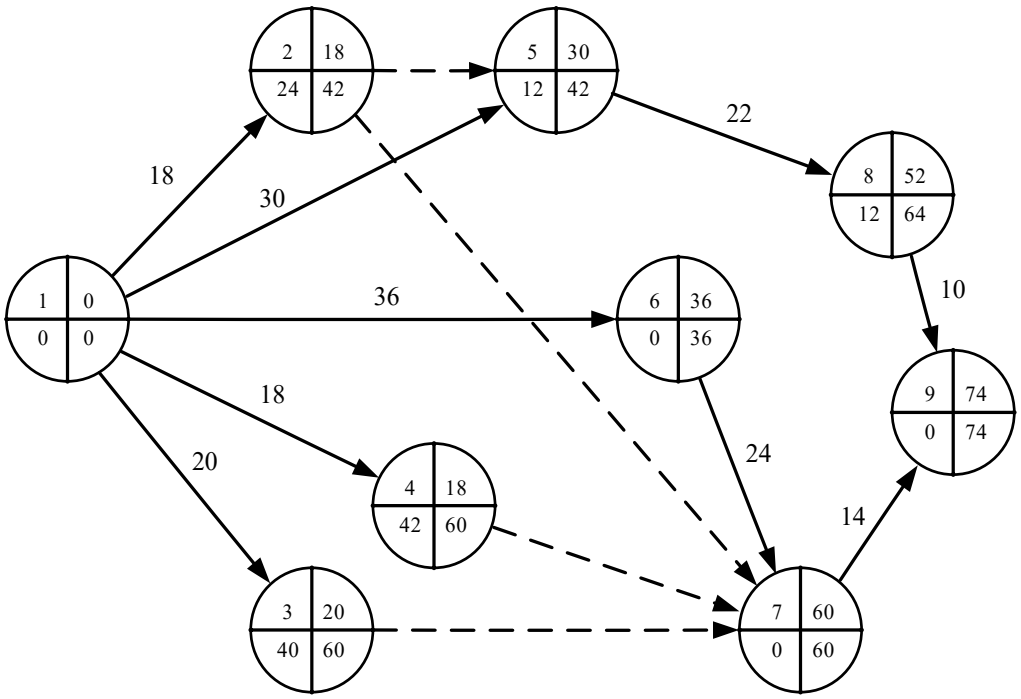

Рис. 2. Начальный вид сетевого графика
Fig. 2. Initial view of the network graph

В табл. 2 показано, что имеется неизрасходованный остаток средств (1008 тыс. руб.), выделенных для проведения планируемого капитального ремонта здания. За счет использования этих средств имеется возможность оптимизировать сетевой график выполнения работ в целях сокращения времени проведения капитального ремонта. Для этого можно уменьшить продолжительность выполнения работ, входящих в состав критического пути, если исполнители будут трудиться не 1 смену в день, а больше, например, 1,5 смены в день. На такой режим труда целесообразно перевести исполнителей той работы в составе критического пути, которой соответствует наименьший тариф оплаты труда. Судя по таблице 2, к ним относятся исполнители работы с кодом 1–6. В целях оптимизации планирования капитального ремонта здания каждого исполнителя работы 1–6 можно перевести на режим 1,5 смены в день с коэффициентом 2. При этом продолжительность работы существенно снизится и составит 36 : 1,5 = 24 дня, а фонд оплаты труда потребует двойного увеличения и будет равен 2016 тыс. руб. В таком случае все средства, выделенные на капитальный ремонт здания, будут израсходованы. В результате вышеуказанной оптимизации получим два критических пути. Первый критический путь содержит работы 1–5, 5–8 и 8–9. Второй критический путь содержит работы 1–6, 6–7 и 7–9. Суммарная продолжительность работ, входящих в состав любого критического пути, равна 62 дням. Таким образом, выполненная оптимизация дает возможность сократить время проведения планируемого капитального ремонта здания на 12 дней.

Рассмотрим применение предложенного метода прогнозирования продолжительности выполнения работ в целях сокращения времени проведения капитального ремонта. В качестве примера спрогнозируем продолжительность работы 1–6 в соответствии с предложенным методом. Для этого необходимо настроить соответствующую ANFIS-модель. Формирование обучающих массивов должно осуществляться с использованием базы данных, содержащей сведения о составах исполнителей, наборах используемых материалов, сложности условий, а также значениях нормативной и реальной продолжительности работ, выполненных в ходе завершенных капитальных ремонтов зданий. Для настройки ANFIS-модели, предназначенной для прогнозирования реальной продолжительности работы 1–6, использовалась обучающая выборка из 385 строк. Обучение модели выполнялось с использованием гибридного алгоритма. Для минимизации ошибки обучения потребовалось около 120 циклов.

В результате произведенной настройки получены значения параметров функций принадлежности входных переменных и индивидуальных выводов нечетких правил: *INQAa* = 0,2846; *INQAb* = 0,6305; *INQAc* = 1,216 и *INQAd* = 1,959. На основе применения ANFIS-модели выполнены процедуры нечеткого вывода. В результате установлено, что для значений входных переменных *INQ* = 1,65, *INE* = 1,38 и *INC* = 1 значение выходной переменной *K* составляет 0,833. С использованием формулы (1) и данных о значениях *K* и *St* в режиме 1 смена в день, вычислено значение прогнозируемой продолжительности для работы 1–6, которое составило 30 дней. Аналогичным образом на основе применения предложенного метода вычислены значения *K* и *Act* для остальных работ планируемого капитального ремонта здания. Для оптимизации данного сетевого графика можно предложить отраженный в табл. 2 остаток средств (1008 тыс. руб.) использовать для оплаты дополнительного труда исполнителям работ 1–5 и 1–6. Чтобы указанный остаток был израсходован, следует перевести исполнителей этих работ на режим 1,25 смены в день, т. е. установить для них 10-часовый ежедневный труд. В таком случае реальная продолжительность этих работ вместо 30 дней составит 30 :1,25 = 24 дня. При этом коэффициент увеличения оплаты труда будет равен 1,5, а фонд оплаты труда каждой из этих работ составит 1512 тыс. руб. Тогда суммарный фонд оплаты труда составит 8316 тыс. руб., а все выделенные на капитальный ремонт средства будут израсходованы.

В результате вышеуказанной оптимизации с применением предложенного метода получим сетевой график, изображенный на рис. 3. В нем имеется два критических пути. Первый критический путь содержит работы 1–5, 5–8 и 8–9. Второй критический путь содержит работы 1–6, 6–7 и 7–9. Суммарная продолжительность работ, входящих в состав любого критического пути, равна 52 дням. Таким образом, в рассмотренном примере выполненная оптимизация на основе предложенного метода дает возможность сократить время проведения планируемого капитального ремонта здания на 10 дней или на 16,13 % по сравнению с оптимизацией без применения предложенного метода.

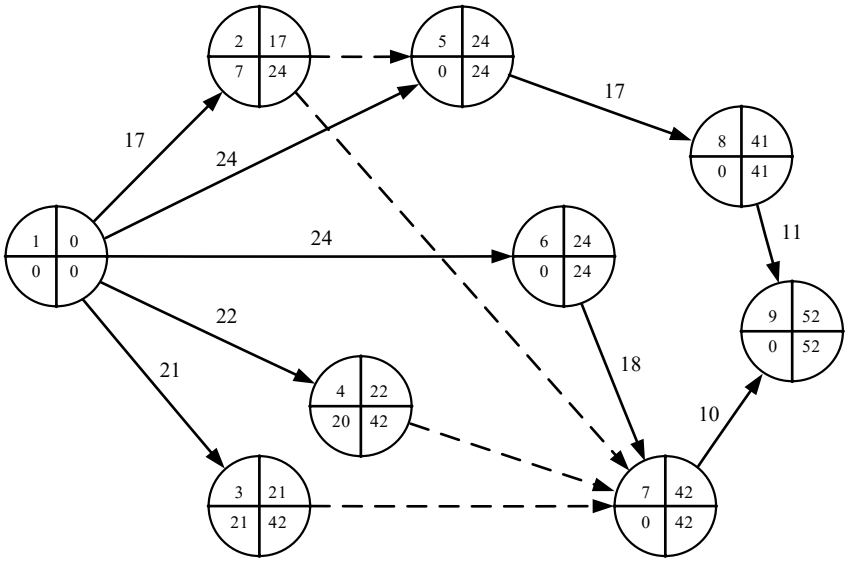

Рис. 3. Сетевой график, оптимизированный на основе применения предложенного метода
Fig. 3. Network schedule optimized based on the proposed method

В результате проведения многочисленных вычислительных экспериментов с другими исходными данными установлено, что применение предложенного метода позволяет сократить время проведения капитальных ремонтов зданий на величину от 9,26 % до 18,34 %. Таким образом, проведенное исследование показало работоспособность предложенного метода прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий и целесообразность его применения на практике.

Заключение

Таким образом, в статье представлено решение актуальной научно-технической задачи, состоящей в разработке метода прогнозирования продолжительности работ капитального ремонта зданий. Предложенный метод основан на применении нечеткого логического вывода для оценивания коэффициента корректировки продолжительности выполнения работы относительно нормативного значения. В качестве входных переменных используются показатели важнейших факторов, влияющих на продолжительность выполнения конкретной работы. К ним относятся квалификация исполнителей, качество используемых материалов и сложность условий выполнения работы. Настройка параметров нечеткого вывода осуществляется с применением ANFIS-модели, для обучения которой составляется выборка, учитывающая ретроспективные результаты выполнения работ с участием определенных исполнителей и использованием тех или иных наименований материалов, сведения о которых заносятся в базу данных. Выполнение многочисленных вычислительных экспериментов показало, что применение предложенного метода позволяет существенно сократить время проведения капитальных ремонтов зданий за счет рационального перераспределения исполнительских и материальных ресурсов с учетом прогнозируемой продолжительности работ.

Полученные результаты могут использоваться в дальнейших исследованиях, которые будут посвящены построению автоматизированной системы планирования капитальных ремонтов зданий и разработке соответствующего программного обеспечения.

Список литературы

Ершов Р.М., Топчий Д.В., 2021. Методика формирования сетевого плана капитального ремонта и реконструкции общественных зданий с использованием теории нечетких множеств. *Строительное производство*, 3: 41–48.

Махди Т.Н., Игитян Е.В., Польщиков К.А., Корсунов Н.И. 2022. Оценивание эффективности функционирования диалоговой системы на основе применения нечеткого вывода с нейросетевой настройкой. *Экономика. Информатика*, 49(2): 356–374. DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-2-356-374.

Польщиков К.А., Лазарев С.А., Константинов И.С., Польщикова О.Н., Свойкина Л.Ф., Игитян Е.В., Балакшин М.С. 2020. Модель для оценки эффективности выполнения робототехнической системой коммуникативных функций. *СТИН*, 6: 4–7.

Польщиков К.А., Польщикова О.Н., Игитян Е.В., Балакшин М.С. 2019. Алгоритм поддержки принятия решений по выбору средств обработки больших массивов естественно-языковых данных. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*, 46(3): 553–562. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-553-562.

Топчий Д.В., Ершов Р.М., Токарский А.Я. 2022. Особенности строительно-монтажных работ при капитальном ремонте и реконструкции административных зданий. *Строительное производство*, 4: 52–58.

Aliahmad M., Miri M., Rashki M. 2024. Comparison of Importance Sampling Method with Other Probability Estimation Methods for Completion of Construction Projects. *Journal of Structural and Construction Engineering*,11(3): 131–145.

Aliyu A.M. 2024. Project Management: An Objective Assessment of Activity Duration. *Open Access Journal of Data Science and Artificial Intelligence*, 2(1), 1–9.

Andiyan A., Putra R.M., Rembulan G.D., Tannady H. 2021. Construction Project Evaluation Using CPM-Crashing, CPM-PERT and CCPM for Minimize Project Delays. Journal of Physics: Conference Series, 1933 (1): 012096.

Aulia S., Cipta H. 2023. Network Planning Analysis Using CPM and PERT Methods on Optimization of Time and Cost. *Sinkron. Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, 7(1): 171–177.

Chang Y., Jiang Y., Zhang C., Xue A., Chen B., Zhang W., Xu L., Liu X., Dai Y. 2021. PERT based emergency disposal technique for fracture failure of deepwater drilling riser. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201: 108407.

Deng J., Jian W. 2022. Estimating Construction Project Duration and Costs upon Completion Using Monte Carlo Simulations and Improved Earned Value Management. *Buildings*, 12 (12): 2173.

Desticioğlu B. 2022. Project planning with CPM and PERT methods: example of defence industry. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2): 363–385.

Farida Y., Anenda L.P. 2022. Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT)-Critical Path Method (CPM) and Crashing Method. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4): 377–390.

Haekal J., Masood I. 2023. Simulation of ERP project scheduling using CPM and PERT method with promodel: A case studies in food and beverage companies in Jakarta Selatan, Indonesia. AIP Conference Proceedings, 2530 (1): 040003.

Hudda S., Barnwal R., Chejara T., Khurana A. 2025. An MCDA and PERT Based Novel Approach for Prioritization of User Stories in Agile Environment. *Computational Science and Computational Intelligence*, 2505: 248–262.

Putra E.S., Rodhi N.N., Ratnasari A.K. 2024. Scheduling Analysis on the Heavy Rehabilitation Construction Project of the Dr. R. Koesma Tuban Hospital Building Using the PERT Method. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8: 4977.

Polshchykov K.A., Velikanova A.S., Igityan E.V. 2022. Neural network natural language processing tools for identifying personal priorities in the project performer's selection in the field of smart agriculture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1069(1): 012012.

Silva J., Ávila P., Patrício L. 2022. Improvement of planning and time control in the project management of a metalworking industry – case study. *Procedia Computer Science*, 196: 288–295.

Tam D.S.H., Liu Y., Xu H., Xie S., Lau W.C. 2023. PERT-GNN: Latency Prediction for Microservice-based Cloud-Native Applications via Graph Neural Networks. Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2155–2165.

Zaneldin E., Ahmed W. 2024. A Generic Framework for Managing Schedule and Cost Risks of Construction Activities Using PERT and the EV Technique. *Buildings*, 14(7): 1918.

References

Ershov R.M., Topchiy D.V. 2021. Methodology for Forming a Network Plan for Capital Repair and Reconstruction of Public Buildings Using the Theory of Fuzzy Sets. *Construction production*, 3: 41–48 (in Russian).

Mahdi T.N., Igityan E.V., Polshchikov K.A., Korsunov N.I. 2022. Evaluation of the Dialogue System Efficiency Based on the Application of Fuzzy Inference with Neural Network Settings. *Economics. Information technologies*, 49(2): 356–374 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-356-374.

Pol'shhikov K.A., Lazarev S.A., Konstantinov I.S., Pol'shhikova O.N., Svojkina L.F., Igitjan E.V., Balakshin M.S. 2020. Model' dlja ocenki jeffektivnosti vypolnenija robototehnicheskoj sistemoj kommunikativnyh funkcij [A model for assessing the effectiveness of a robotic system in performing communication functions]. *STIN*, 6: 4–7.

Polshchikov K.A., Polshchikova O.N., Igityan E.V., Balakshin M.S. 2019. The algorithm of decision support in the choice of means of processing large amounts of natural language data. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies*, 46 (3): 553–562 (in Russian). DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-553-562.

Topchiy D.V., Ershov R.M., Tokarskiy A.Y. 2022. Specifics of Construction and Installation Works during Capital Repairs and Reconstruction of Administrative Buildings. *Construction production*, 4: 52–58 (in Russian).

Aliahmad M., Miri M., Rashki M. 2024. Comparison of Importance Sampling Method with Other Probability Estimation Methods for Completion of Construction Projects. *Journal of Structural and Construction Engineering*,11(3): 131–145.

Aliyu A.M. 2024. Project Management: An Objective Assessment of Activity Duration. Open Access *Journal of Data Science and Artificial Intelligence*, 2(1), 1–9.

Andiyan A., Putra R.M., Rembulan G.D., Tannady H. 2021. Construction Project Evaluation Using CPM-Crashing, CPM-PERT and CCPM for Minimize Project Delays. Journal of Physics: Conference Series, 1933 (1): 012096.

Aulia S., Cipta H. 2023. Network Planning Analysis Using CPM and PERT Methods on Optimization of Time and Cost. *Sinkron. Jurnal Dan Penelitian Teknik Informatika*, 7(1): 171–177.

Chang Y., Jiang Y., Zhang C., Xue A., Chen B., Zhang W., Xu L., Liu X., Dai Y. 2021. PERT based emergency disposal technique for fracture failure of deepwater drilling riser. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201: 108407.

Deng J., Jian W. 2022. Estimating Construction Project Duration and Costs upon Completion Using Monte Carlo Simulations and Improved Earned Value Management. *Buildings*, 12 (12): 2173.

Desticioğlu B. 2022. Project planning with CPM and PERT methods: example of defence industry. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2): 363–385.

Farida Y., Anenda L.P. 2022. Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT)-Critical Path Method (CPM) and Crashing Method. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4): 377–390.

Haekal J., Masood I. 2023. Simulation of ERP project scheduling using CPM and PERT method with promodel: A case studies in food and beverage companies in Jakarta Selatan, Indonesia. AIP Conference Proceedings, 2530 (1): 040003.

Hudda S., Barnwal R., Chejara T., Khurana A. 2025. An MCDA and PERT Based Novel Approach for Prioritization of User Stories in Agile Environment. *Computational Science and Computational Intelligence*, 2505: 248–262.

Putra E.S., Rodhi N.N., Ratnasari A.K. 2024. Scheduling Analysis on the Heavy Rehabilitation Construction Project of the Dr. R. Koesma Tuban Hospital Building Using the PERT Method. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8: 4977.

Polshchykov K.A., Velikanova A.S., Igityan E.V. 2022. Neural network natural language processing tools for identifying personal priorities in the project performer's selection in the field of smart agriculture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1069(1): 012012.

Silva J., Ávila P., Patrício L. 2022. Improvement of planning and time control in the project management of a metalworking industry – case study. *Procedia Computer Science*, 196: 288–295.

Tam D.S.H., Liu Y., Xu H., Xie S., Lau W.C. 2023. PERT-GNN: Latency Prediction for Microservice-based Cloud-Native Applications via Graph Neural Networks. Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2155–2165.

Zaneldin E., Ahmed W. 2024. A Generic Framework for Managing Schedule and Cost Risks of Construction Activities Using PERT and the EV Technique. *Buildings*, 14(7): 1918.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 28.07.2025
Поступила после рецензирования 05.09.2025
Принята к публикации 08.09.2025

Received July 28, 2025
Revised September 05, 2025
Accepted September 08, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Еремин Дмитрий Владимирович, соискатель, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Польщиков Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Маматов Александр Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Eremin, external PhD student, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Konstantin A. Polshchikov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Aleksandr V. Mamatov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Systems, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia