

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 1 / 2023, Vol. 10, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS123.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS123 (<https://doi.org/10.15862/06SATS123>)

Мониторинг процессов производства работ в железнодорожном строительстве с применением экспертных технологий

Полянский А.В.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Полянский Алексей Викторович, e-mail: polal_82@mail.ru

Аннотация. В статье представлены теоретические положения и практические возможности реализации мониторинга технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением экспертных технологий. Железнодорожное строительство как сложная динамическая система, требует определенных затрат ресурсов на свое обслуживание. В этих условиях решающее значение приобретает эффективный контроль над технологией производства работ, выполняемых при строительстве объектов железнодорожного пути. Этого можно достигнуть путем совершенствования существующей системы инженерно-технического сопровождения железнодорожного строительства за счет внедрения подсистемы инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов строительства объектов железнодорожного пути. Одной из задач подсистемы является эффективное использование средств автоматизации с элементами искусственного интеллекта. Появление в ходе производства строительных работ отклонений от плановых требований, вследствие стохастичности железнодорожного строительства, ведет к нарушениям технологии, снижению производительности, росту трудозатрат, себестоимости, увеличению продолжительности и, как следствие, ухудшению эксплуатационных характеристик объекта железнодорожного пути. Во избежание такого развития событий необходим периодический контроль реализации технологических решений. Для этого в рамках формирования методологии инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов железнодорожного строительства разработана система мониторинга реализации технологических процессов строительства объектов железнодорожного пути.

Мониторинг включает три этапа: регистрацию параметров, оценку и прогноз реализации технологического процесса. С учетом особенностей формализации ряда решаемых задач была разработана и описана методика регистрации показателей реализации технологического процесса на временном интервале. Результаты, полученные на этапе оценки, позволили определить возможности применения экспертной системы, построенной на вероятностной модели логического вывода для обработки результатов наблюдения за ходом производства работ при строительстве объекта железнодорожного пути. Механизм логического вывода организован на системе обратной связи и вывода, основанного на вероятностной байесовской логике. Прогноз реализации технологического процесса осуществляется на основе общих методологических вопросов применения марковских случайных процессов. Прогнозная модель и методика получения количественных характеристик прогноза построена на интерпретации свойств простейшего потока для анализа динамики изменения его состояний.

На основе результатов теоретического исследования в статье представлены практические аспекты реализации мониторинга процессов производства работ в железнодорожном строительстве с применением экспертных технологий на примере возведения подпопелемой насыпи железнодорожного земляного полотна.

Результаты, приведённые в статье, получены в ходе диссертационного исследования, выполненного автором.

Ключевые слова: железнодорожное строительство; технологический процесс; объект железнодорожного пути; мониторинг; оценка; прогноз; методы искусственного интеллекта; экспертная система

Monitoring of work execution processes in railway construction using expert technologies

Aleksey V. Polyanskiy

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Aleksey V. Polyanskiy, e-mail: polal_82@mail.ru

Abstract. The article presents the abstract theorem and practical options for monitoring the technological process of a railway track object construction using expert technologies. Railway construction as a complex dynamic system requires certain resources for its maintenance. Under these conditions, effective control over the work execution technology performed during the construction of railway track facilities is of decisive importance. This can be achieved by improving the existing engineering and technical support system for railway construction through the introduction of a subsystem for engineering and technological processes intellectual support for the railway facilities construction. One of the subsystem tasks is the effective use of automation tools with elements of artificial intelligence.

The appearance of deviations from the planned requirements during the construction work execution, due to the stochastic nature of railway construction, leads to technology violations, a decrease in productivity, an increase in labor costs, prime cost, an increase in duration and, as a result, a deterioration in the railway track object operational characteristics. In order to avoid such a development of events, periodic monitoring of the technological solutions implementation is necessary. To this end, as part of the methodology formation for engineering and intellectual support of railway construction technological processes, a system for monitoring the technological processes implementation for the railway facilities construction has been developed.

Monitoring includes three stages: parameters registration, assessment and forecast of the technological process

implementation. Taking into account the formalization peculiarities of a number of tasks to be solved, a method for registering the indicators of the technological process implementation on a time interval was developed and described. The results obtained at the assessment stage made it possible to determine the possibilities of using an expert system built on a probabilistic inference model for processing the results of monitoring the work progress during the railway facility construction. The logical inference mechanism is organized on a system of feedback and inference based on probabilistic Bayesian logic. The forecast of the technological process implementation is based on general methodological issues of the Markov random processes application. The predictive model and the method for obtaining quantitative characteristics of the forecast are based on the interpretation of the simplest flow properties in order to analyze the dynamics of changes in its states.

Based on the results of a theoretical study, the article presents the practical aspects of monitoring the work execution processes in railway construction using expert technologies on the example of the construction of a flooded railway subgrade roadbed.

The results presented in the article were obtained in the course of a dissertation research carried out by the author.

Keywords: railway construction; technological process; railway track object; monitoring; grade; forecast; artificial intelligence methods; expert system

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Данная статья представляет результаты исследования, проводимого в области разработки подсистемы инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов (ИИОТП) системы инженерно-технического сопровождения (ИТС) железнодорожного строительства (ЖДС), в частности, мониторинга реализации технологических процессов (ТП) строительства объектов железнодорожного пути (ОЖДП) [1]. В статье [2] были изложены основные теоретические положения и представлен практический инструментарий, направленные на обеспечение стабильной реализации ТП и рентабельной работы строительной (подрядной) организации (СПО). В ходе настоящего теоретического исследования были разработаны расчетные и расчетно-логические модели для осуществления процедуры мониторинга. Практическое применение моделей предусматривает использование экспериментальных программных модулей, в основе которых лежат автоматизированные и интеллектуальные средства обработки и анализа данных.

1. Теоретические основания создания системы мониторинга реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением экспертной системы

1. Theoretical grounds for creating a system for monitoring the technological process implementation of a railway track object construction using an expert system

В рамках применения подсистемы ИИОТП предусмотрено периодическое сравнение проектного технологического процесса (ТПП), полученного на этапе разработки, и фактического технологического процесса (ТПФ), реализуемого в ходе строительства ОЖДП. Для этого при реализации ТП осуществляется постоянный контроль режимов эксплуатации технических средств (ТС), работы исполнителей, условий выполнения и реконфигурации строительно-монтажных работ. Постоянный (периодический) характер контроля позволяет отнести данную процедуру к системе мониторинга реализации ТП [1–4].

Мониторинг является процедурой циклической и учитывая объем поступающей информации возникает необходимость в ее оперативной обработке. Причем сама обработка информации подразумевает использование не только вычислительных процедур, но и логических,

направленных на обоснование текущей реализации ТП [5–8]. Перечисленные обстоятельства потребовали разработки расчетных и расчетно-логических моделей для осуществления трех основных функций мониторинга [1; 3]:

1. Регистрации показателей реализации ТП.
2. Оценки реализации ТП.
3. Прогноза реализации ТП.

Регистрация показателей реализации ТП осуществляется в определенные моменты времени в пределах временных периодов (часов/смен) с применением визуальных средств программного или аппаратного типа [5; 6; 9; 10]. Выбор способов регистрации зависит от конфигурации ТП, вида используемых ресурсов, внешних и внутрипроизводственных факторов, которые определяют показатели реализации ТП. При этом показатели могут быть как абсолютными (числовыми величинами), так и относительными (приведенными к качественным параметрам ОЖДП). В рамках проводимого исследования было выделено три группы показателей [1; 11]:

1. Готовность ресурсов ТП на момент времени (t):

$$I_1(t) = \{W_{SZ}(t), W_{SF}(t), E_{SZ}(t), E_{SF}(t), M_{PM_i}(t), M_{SF}(t)\}, \quad (1)$$

где $W_{SZ}(t)$ — обеспечение ТП проектным количеством исполнителей работ; $W_{SF}(t)$ — обеспечение требований безопасности реализации ТП исполнителями; $E_{SZ}(t)$ — обеспечение ТП проектным количеством технических средств; $E_{SF}(t)$ — обеспечение требований безопасности реализации ТП техническими средствами; $M_{PM_i}(t)$ — соответствие материалов и изделий физико-механическим характеристикам; i — количество характеристик; $M_{SF}(t)$ — обеспечение требований безопасности реализации ТП при использовании материалов и изделий.

2. Условия производства работ на момент времени (t):

$$I_2(t) = \{PD(t), WD(t), FW(t), CW_j(t), EE(t)\}, \quad (2)$$

где $PD(t)$ — наличие разрешительной документации на производство работ; $WD(t)$ — наличие рабочей документации на производство работ; $FW(t)$ — готовность фронта работ; $CW_j(t)$ — погодные-климатические условия (соответствие температуры воздуха, осадки, ветровые воздействия требованиям проектной и рабочей документации); j — количество характеристик; $EE(t)$ — соблюдение требований охраны окружающей среды.

3. Соответствие ОЖДП проектным требованиям на момент времени (t):

$$I_3 = \{DR, DR_k^*, QR, QR_k^*\}, \quad (3)$$

где DR — соответствие ОЖДП проектным требованиям; DR_k^* — соответствие конструктивных элементов ОЖДП проектным требованиям; QR — соответствие ОЖДП требованиям качества; QR_k^* — соответствие конструктивных элементов ОЖДП требованиям качества.

Функция *оценки* предполагает обработку определенного объема данных, полученного в ходе регистрации показателей реализации ТП строительства ОЖДП.

Оценка реализации ТП относится к категории слабо формализуемых и требует согласованного взаимодействия результатов регистрации показателей ТП с требованиями строительных нормативов. По сути осуществляется проверка соответствия текущих простых технологических процессов (ПТП) проектным (плановым) показателям с одновременным уточнением текущей потребности в ресурсах [4]. Из-за большого объема поступающей информации (различного свойства) и необходимости ее оперативной обработки для получения оптимального результата предлагается к использованию экспертная система (ЭС). Основная задача ЭС — помощь СПО в настройке параметров ТП, в оптимизации этой процедуры с учетом погодно-климатических воздействий или изменений, связанных с ресурсным обеспечением строительства. ЭС позволяет анализировать показатели реализации ТП с помощью встроенного механизма логического вывода и информировать СПО о ходе производства работ [12; 13].

Сам механизм логического вывода (МЛВ) построен на системе обратной связи и вывода, основанных на вероятностной байесовской логике [14]. Работа МЛВ заключается в накоплении определенных данных, так называемых знаний (нормативных, опытных, экспертных), их систематизации в компьютерной базе знаний (БЗ) с последующей обработкой по ситуации [14–18].

На рисунке 1 представлена схема оценки реализации ТП строительства ОЖДП с применением ЭС. Предложенный подход обеспечивает накопление, формализацию и сравнение проектных и фактических показателей реализации ТП. Интеллектуальный режим позволяет осуществить их анализ и генерацию выводов для определенного момента времени t с использованием вероятностной модели представления знаний (МПЗ) [14; 15].



Рисунок 1. Схема функционирования экспертной системы (разработано автором)

Figure 1. Functioning diagram of the expert system (developed by the author)

Выбор байесовский системы логического вывода и вероятностной МПЗ позволяет разработанной ЭС использовать степень уверенности при проведении оценки реализации ТП, учитывая неточные и ненадежные регистрируемые данные. Для этого в ЭС был использован способ «рассуждения» в условиях возможной неопределенности.

Работа МЛВ опирается на математический аппарат теории вероятностей, в частности на теорему Байеса. В основу теоремы положена формула, позволяющая накапливать данные, которыми являются регистрируемыми показателями реализации ТП, для последующего подтверждения или неподтверждения определенной гипотезы [14]. Это значит следующее: факт наступления некоторого события может быть представлен гипотезой H и соответствующей ей априорной вероятностью $P(H)$. Значение вероятности может быть предварительно задано или получено в результате предыдущих расчетов. В то же время факт (исход) наступления события (истинность гипотезы) H может быть подтвержден свидетельством E . Тогда по формуле Байеса получится:

$$P(H | E) = \frac{P(E | H)P(H)}{P(E | H)P(H) + P(E | \bar{H})P(\bar{H})}. \quad (4)$$

Формулу (4) можно прокомментировать на примере проводимого исследования. Пусть в ходе осуществления ТП наметилось отклонение от проектных требований — это утверждение будет считаться гипотезой H . Истинность этой гипотезы будет определяться априорной вероятностью $P(H)$, полученной, например, на основе статистических данных и показывающей, что применительно к определенным условиям производства работ при реализации ТП могут возникать отклонения. Пусть E означает свидетельство снижения производительности работ. Используя формулу Байеса, можно определить $P(E / H)$ — вероятность отклонения от проектных требований в случае снижения производительности работ. А для этого необходимо знать [14; 17]:

- $P(E | H)$ — вероятность снижения производительности работ при отклонении от проектных требований;
- $P(E | \bar{H})$ — вероятность снижения производительности работ при плановой реализации ТП.

Указанные вероятности считаются известными, как результат обработки статистических данных. В этом случае значения вероятностей $P(H)$, $P(E | H)$, $P(E | \bar{H})$ можно предварительно определить и обеспечить им универсальный характер, не привязанный к показателям реализации конкретного ТП строительства ОЖДП.

Так как:

$$P(\bar{H}) = 1 - P(H), \quad (5)$$

а значения правых частей известны и принимают такие значения как, например:

$$P(H) = 0,001, P(\bar{H}) = 0,999, P(E | H) = 1,0, P(E | \bar{H}) = 0,01,$$

то по формуле Байеса:

$$P(H | E) \cong 0,009.$$

Это значит, что вероятность отклонения от проектных требований в ходе реализации ТП в связи с появлением свидетельства о снижении производительности работ увеличилась и составила 0,009, в то время как исходная априорная вероятность составляла 0,001.

Применению ЭС для оценки реализации ТП строительства ОЖДП предшествует этап подготовки БЗ. Знания представляют собой следующую структуру [14; 15]:

- перечень вариантов исхода — m ;
- набор свидетельств (вопросов) — n ;
- вероятности получения положительного ответа для j -го свидетельства, если i -й исход верен: $P_{Д_{ij}}$;
- вероятности получения отрицательного ответа для j -го свидетельства, если i -й исход верен: $P_{Н_{ij}}$;
- матрица вероятностей $P_{Д} = \{P_{Д_{ij}}\}$ и $P_{Н} = \{P_{Н_{ij}}\}$ размером $m \times n$;
- априорные вероятности исходов (для случаев отсутствия дополнительной информации) — P .

Свидетельствами являются данные, полученные в ходе регистрации показателей реализации ТП, а вариантами исхода — оценочный признак реализации ТП. БЗ формируется по следующей схеме:

$$БЗ = \{ \text{Свидетельство } \text{№} n \}; \{ \text{Исход } \text{№} m, P, [i, P_d, P_H] \}. \quad (6)$$

Первая часть структуры БЗ включает перечень из n свидетельств (показателей реализации ТП), а во второй части перечисляются m исходов (вариантов оценки реализации ТП) и соответствующие им элементы матриц вероятностей.

Правило логического вывода включает в себя:

- исход;
- априорную вероятность исхода P ;
- повторяющиеся группы из совокупности следующих параметров:
 - i — номер свидетельства;
 - P_d — вероятность подтверждения свидетельства, что возможный исход верен;
 - P_H — вероятность подтверждения свидетельства, что возможный исход неверен.

Важной особенностью структуры правила является формирование перечня только из тех свидетельств, которые определяют вероятность данного исхода [14; 15; 17].

Принципиальная схема работы ЭС «Оценка» предполагает следующий порядок:

- сначала из БЗ считывается априорная вероятность $P(H)$;
- при последовательном поступлении свидетельств E вероятность пересчитывается по формуле Байеса и обновленная (увеличенная или уменьшенная) записывается на место $P(H)$;
- после обработки всех свидетельств формируется окончательное заключение — наиболее вероятный исход в качестве результата оценки реализации ТП.

Таким образом, в зависимости от ответа «исполнителя СПО» (инженера ПТО, производителя работ) получаемого на каждый вопрос (по перечню свидетельств) механизм логического вывода ЭС определяет апостериорную вероятность каждого исхода. То есть само значение вероятности корректируется по мере поступления ответов на каждый вопрос. Для расчета значений используются правила и формула Байеса [14]:

- при положительном ответе:

$$P_{АПС} = \frac{P_{Д_{ij}} \cdot P_i}{P_{Д_{ij}} \cdot P_i + P_{H_{ij}} \cdot (1 - P_i)}, \quad (7)$$

- при отрицательном ответе:

$$P_{АПС} = \frac{(1 - P_{Д_{ij}}) \cdot P_i}{(1 - P_{Д_{ij}}) \cdot P_i + (1 - P_{H_{ij}}) \cdot (1 - P_i)}, \quad (8)$$

- при неопределенном ответе апостериорная вероятность равна априорной.

Если для ответа нельзя применить точное значение, то апостериорную вероятность можно рассчитать линейной интерполяцией от значений утвердительных ответов, используя коэффициент уверенности принадлежности признака. Для этого необходим интервал значений, например, от -5 до 0 и от 0 до +5, соответствующий диапазону ответов h с шагом 1 от «Нет» до «Да», кроме «Не определено».

При отрицательном ответе, для случая:

$$h \in (-5; 0), \text{ тогда } P_{АПС}^* = P_i + (P_i - P_{АПС}(неE)) \cdot \frac{h}{5}. \quad (9)$$

При положительном ответе, для случая:

$$h \in (0; +5), \text{ тогда } P_{АПС}^* = P_i + (P_{АПС}(E) - P_i) \cdot \frac{h}{5}. \quad (10)$$

На основе предложенной концепция логического вывода и интерфейса программной оболочки ЭС, были определены несколько режимов оценки: общая оценка ТП, оценка работы исполнителей (трудовых ресурсов), оценка работы машин (технических средств), оценка работы с материалом.

Результат генерируемый ЭС представляет собой совокупность общей оценки реализации ТП (или готовности ресурса) и значения вероятности, определившей данный результат [1]:

- ТП *налажен (норма)*: $P \in [0,95; 1]$ — отклонения от проектных требований отсутствуют или носят незначительный характер, $P_{ТПН}$;
- ТП *разлажен (отклонение)*: $P \in [0; 0,95)$ — при последующей эксплуатации ОЖДП высока вероятность возникновения дефектов, деформаций и прочих отклонений от проектных требований, $P_{ТПО}$;

- ресурс *готов*: $P=1$ — обеспечивается полное соответствие ресурса для реализации ТП проектным требованиям, P_{PII} ;
- ресурс *частично готов*: $P \in [0,90; 0,99]$ — допускается ограниченное использование ресурса для реализации ТП с незначительным отклонением от проектных требований, но при полном соблюдении требований безопасности производства работ, P_{PCH} ;
- ресурс *не готов*: $P \in [0; 0,90)$ — не обеспечивается соответствие ресурса для реализации ТП проектным требованиям — его использование невозможно, необходима замена, P_{PHI} .

Полученные в ходе наблюдения и оценки реализации ТП строительства ОЖДП результаты позволяют *прогнозировать* перспективы производства работ. Для этого необходимо сформировать общую прогнозную модель для определенного временного интервала как для известных, так и для ранее не встречавшихся ситуаций¹.

В связи с тем, что возникающие при реализации ТП ситуации и события носят случайный характер, их изучение должно опираться на вероятностную основу. Наиболее подходящими здесь будут математические модели теории случайных процессов (СлП) [1].

Для математического описания нескольких операций, развивающихся в форме СлП, может быть применён математический аппарат, разработанный для марковских СлП. При этом для анализа динамики вероятностных свойств ТП, будет служить простейший поток событий (последовательность однородных событий, появляющихся в случайные моменты времени), с дискретными состояниями и непрерывным временем [19; 20].

В общем случае «поток событий» представляет собой просто последовательность случайных точек $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n, \dots$ на оси времени $0-t$ (рис. 2) с разделяющими их случайными интервалами $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n, \dots$, так что:

$$T_1 = \Theta_2 - \Theta_1, T_2 = \Theta_3 - \Theta_2, \dots, T_n = \Theta_{n+1} - \Theta_n.$$

Это значит, что для любого момента времени t условные вероятности всех состояний реализуемого ТП в будущем зависят только от того, в каком состоянии он находится в настоящем (при $t = t_0$), но не зависит от того, когда и каким образом он пришёл в это состояние и сам переход

¹ Полянский, А.В. Мониторинг технологического процесса возведения насыпей земляного полотна: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Полянский Алексей Викторович. — М., 2006. — 190 с.

возможен в любой момент. Например, отклонения в ТП от проектных требований могут произойти в любой момент времени.

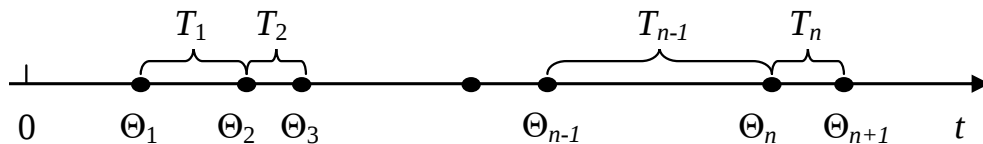


Рисунок 2. Последовательность случайных точек на оси времени (разработано автором)

Figure 2. A sequence of random points on the time axis (developed by the author)

ТП строительства ОЖДП не остается неизменным и постепенно меняется, то есть «стареет», в результате случайных переходов из состояния в состояние из-за появления различных отклонений от проектных требований. Такое «старение» ТП, вследствие постепенного перехода ТП из одного состояния в другое, позволяет отнести его к процессам типа простейшего потока.

Для формирования прогнозной модели и получения количественных характеристик прогноза реализации ТП осуществляется интерпретация свойств простейшего потока с целью анализа динамики изменения его состояний [1].

Полная картина последовательных переходов ТП из одного состояния в другое отражается графом состояний и переходов (рис. 3). Число вершин графа равно числу состояний, возникающих в ТП.

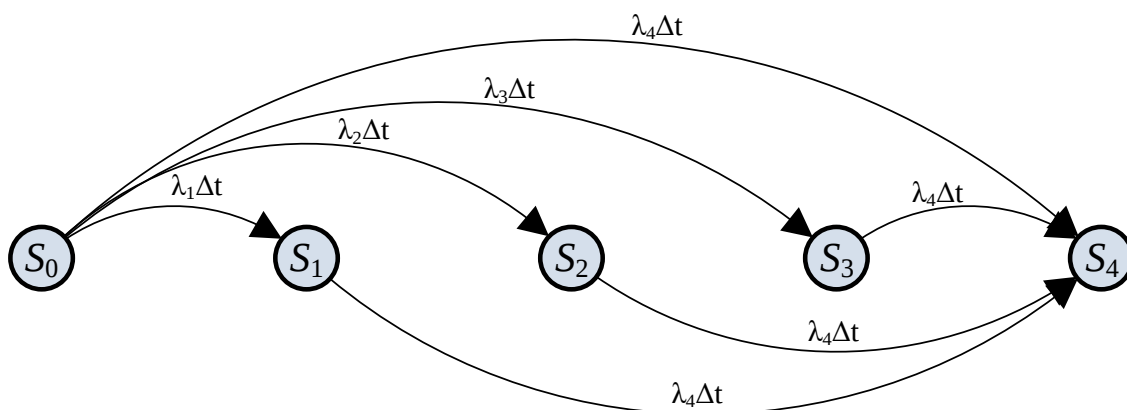


Рисунок 3. Граф состояний технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 3. State graph of the technological process of railway track facility construction (developed by the author)

Для исследования предложена модель из пяти состояний, которая раскрывает развитие ситуации при реализации ТП строительства ОЖДП с учетом отклонений от проектных требований. При этом в модели рассмотрены состояния, как условно самостоятельные этапы процесса:

- S_0 — соответствие ТП проектным требованиям;
- S_1 — несоответствие ТП по составу/количеству исполнителей (неготовность исполнителей);
- S_2 — несоответствие ТП по составу/количеству ТС (неготовность ТС);
- S_3 — несоответствие ТП по характеристикам/качеству материала (неготовность материала);
- S_4 — полное несоответствие ТП проектным требованиям.

Входными параметрами при формировании и формализации модели ТП являются интенсивности переходов — λ , которые отражают среднее число событий простейшего потока наступающих в единицу времени. Интенсивность переходов может быть любой неотрицательной функцией времени и имеет размерность, 1/время (11):

$$\lambda_i = \frac{1}{T} \cdot b_i, \quad (11)$$

где i — порядковый номер состояния ТП, $i \in [1; 4]$; b_i — оценочный параметр реализации ТП (или готовности ресурса), $b_i \in [0; 8]$; T — время реализации ТП, 8 часов (смена).

В рамках проводимого исследования параметр λ_i показывает интенсивность перехода ТП в i -е состояние и привязан к данным наблюдения и оценки. Значение b_i представляет собой оценку реализации ТП (или готовности ресурса) представленную на интервале от 0 до 8 (в данном случае количество часов в смене) с шагом 0,01.

В результате были приняты следующие интенсивности переходов, связанные с:

- несоответствием ТП составу/количеству исполнителей (неготовность исполнителей) — λ_1 (1/час);
- несоответствием ТП составу/количеству ТС (неготовность ТС) — λ_2 (1/час);
- несоответствием ТП характеристикам/качеству материала (неготовность материала) — λ_3 (1/час);
- полным несоответствием ТП проектным требованиям — λ_4 (1/час), причем (12)

$$\lambda_4 = \lambda_4' + \lambda_4'' + \lambda_4''' , \quad (12)$$

где λ_4' — негативное влияние условий производства работ на ТП;
 λ_4'' — нарушение требований безопасности при реализации ТП;
 λ_4''' — отклонения при операционном контроле качества ОЖДП;

Ребра ориентированного графа (рис. 3) показывают возможные переходы ТП из состояния в состояние под действием известных интенсивностей переходов.

При этом переход ТП из состояния S_i в состояние S_j за время Δt с точностью до бесконечно малых высших порядков происходит с вероятностью (13):

$$P_i(t) = \lambda_i \Delta t. \quad (13)$$

Таким образом, для рассматриваемой прогнозной модели ТП переходные вероятности будут следующие:

- с вероятностью $\lambda_1 \Delta t$ произойдет переход из состояния S_0 в состояние S_1 за время Δt в случае несоответствия ТП составу/количеству исполнителей (неготовность исполнителей);
- с вероятностью $\lambda_2 \Delta t$ произойдет переход из состояния S_0 в состояние S_2 за время Δt в случае несоответствия ТП составу/количеству ТС (неготовность ТС);
- с вероятностью $\lambda_3 \Delta t$ произойдет переход из состояния S_0 в состояние S_3 за время Δt в случае несоответствия ТП характеристикам/качеству материала (неготовность материала);
- с вероятностью $\lambda_4 \Delta t$ произойдет переход из состояния S_0 в состояние S_4 или из состояния S_1 в состояние S_4 или из состояния S_2 в состояние S_4 или из состояния S_3 в состояние S_4 , в случае полного несоответствия ТП проектным требованиям.

Прогноз реализации ТП состоит в получении вероятностей его нахождения в определенном состоянии: $P_i(t)$, $i = 0, 2, \dots, 4$.

Для решения задачи используется система дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова [14; 19].

Начальные условия $P_i(0)$ назначаются, исходя из рассматриваемого периода реализации ТП.

Для рассматриваемой модели ТП строительства ОЖДП, представленной в виде ориентированного графа (рис. 3), система дифференциальных уравнений имеет вид (14):

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_0(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \lambda_4 P_1(t); \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - \lambda_4 P_2(t); \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_3 P_0(t) - \lambda_4 P_3(t); \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_4 P_0(t) + \lambda_4 P_1(t) + \lambda_4 P_2(t) + \lambda_4 P_3(t). \end{cases} \quad (14)$$

На основе полученной системы уравнений можно определить вероятности нахождения ТП в каждом из состояний в момент времени t при заданных начальных ненулевых условиях с учетом того, что сумма вероятностей всех состояний процесса равна единице.

В начальный момент времени $t = 0$ ТП строительства ОЖДП полностью соответствует проектным требованиям, то есть:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0.$$

Решением системы уравнений (14), с учетом принятых начальных условий, является алгебраическая система линейных уравнений (функций), полученная операторным методом с применением обратного преобразования Лапласа:

$$\begin{cases} P_0(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}; \\ P_1(t) = \frac{2\lambda_1 \cdot e^{-\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}{2}}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}; \\ P_2(t) = \frac{2\lambda_2 \cdot e^{-\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}{2}}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}; \\ P_3(t) = \frac{2\lambda_3 \cdot e^{-\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t}{2}}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}; \\ P_4(t) = 1 - e^{-\lambda_4 t} \end{cases} \quad (15)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (15) позволяет отследить динамику ТП строительства ОЖДП путем отслеживания вероятностей в определенные промежутки времени (например, в течение смены).

Для прогнозирования реализации ТП следует учесть особенность марковского СлП: вероятности состояний на будущих шагах зависят от

настоящих. Тогда вероятность отказа ТП в целом будет определяться по формуле (16):

$$Q(t) = \sum_{i=1}^4 P_i(t), \quad (16)$$

Полученная формула позволяет осуществить прогнозирование состояния полного несоответствия ТП проектным требованиям на основе данных от предыдущих состояний ТП. Это, в свою очередь, дает возможность математически описать процедуру прогнозирования реализации ТП и выделить следующие варианты прогноза реализации ТП строительства ОЖДП [1]:

- *стабильный* прогноз — вероятна реализация ТП в соответствии с проектными требованиями для случая, если $Q(t) < 0,995$ на протяжении рассматриваемого временного периода, например, смены (8 час);
- *развивающийся* прогноз — вероятна реализация ТП с частичными отклонениями от проектных требований для случая, если $Q(t) < 0,995$ на протяжении половины рассматриваемого временного периода, например, $\frac{1}{2}$ смены (4 час);
- *негативный* прогноз — вероятна реализация ТП с существенными отклонениями от проектных требований для случая, если $Q(t) < 0,995$ на протяжении менее половины рассматриваемого временного периода, например, менее $\frac{1}{2}$ смены (меньше 4 час).

Разработанная прогнозная модель позволяет получить конкретные значения вероятностей обнаружения несоответствия ТП и понять перспективы его развития на определенном временном интервале.

Полученные на основе мониторинга реализации ТП строительства ОЖДП результаты являются основой для принятия решения в части регулирования производственной ситуации.

2. Практические аспекты применения мониторинга реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути

2. Practical application aspects of monitoring the technological process implementation of railway track facility construction

Для практического осуществления мониторинга реализации ТП строительства ОЖДП используются экспериментальные программные модули ИАС:

- «Наблюдение» позволяет в автоматизированном режиме регистрировать показатели реализации ТП. Для этого используется программная оболочка, реализующая интерфейс, и БД «Наблюдение». БД предназначена для накопления и хранения результатов регистрации показателей реализации ТП.
- «ЭС «Оценка» реализует интеллектуальный режим оценки хода производства работ (реализацию ТП). Включает в себя БД «Оценка» (упорядоченную совокупность сведений о процедуре и результатах оценки реализации ТП) и ЭС. Сама ЭС состоит из двух блоков: БЗ «Оценка» — хранилища правил-продукций, необходимых для проведения оценки реализации ТП, и интеллектуального решателя, реализующего байесовскую систему логического вывода.
- «Прогноз» позволяет в автоматизированном режиме осуществлять прогнозирование реализации ТП. Состоит из программной оболочки, реализующей интерфейс, и БД «Прогноз». БД предназначена для накопления и хранения результатов прогнозирования реализации ТП.

Данные, получаемые в модулях подсистемы ИАС «Мониторинг», передаются в соответствующие разделы адаптивного цифрового технологического регламента (АЦТР) для последующего уточнения/изменения (при необходимости) технологического сценария [4].

Для примера практического применения мониторинга реализации ТП рассмотрено возведение участка подтопленной насыпи железнодорожного земляного полотна (ЖДЗП) с устройством полуобоймы из геотекстиля. Участок длиной 400 м расположен на однопутной железнодорожной линии IV категории (подъездной путь к порту) проходящей в Астраханской области. В статьях [1; 4] и других работах автора были рассмотрены этапы разработки ТП (ТПП) в рамках инженерно-интеллектуального обеспечения возведения участка указанной насыпи. Далее будет показано поэтапное применение системы мониторинга реализации ТП для работы (ППП) «II.2. (ГЭСН 01-01-031-05) Разравнивание грунта бульдозером» [1; 4].

С применением модуля ИАС «Наблюдение» в автоматизированном режиме была проведена регистрация показателей реализации ТП возведения ЖДЗП (рис. 4).

На основе полученных данных с привлечением ЭС вероятностного типа (модуль ИАС «ЭС «Оценка») проведена оценка реализации ТП (рис. 5–8).

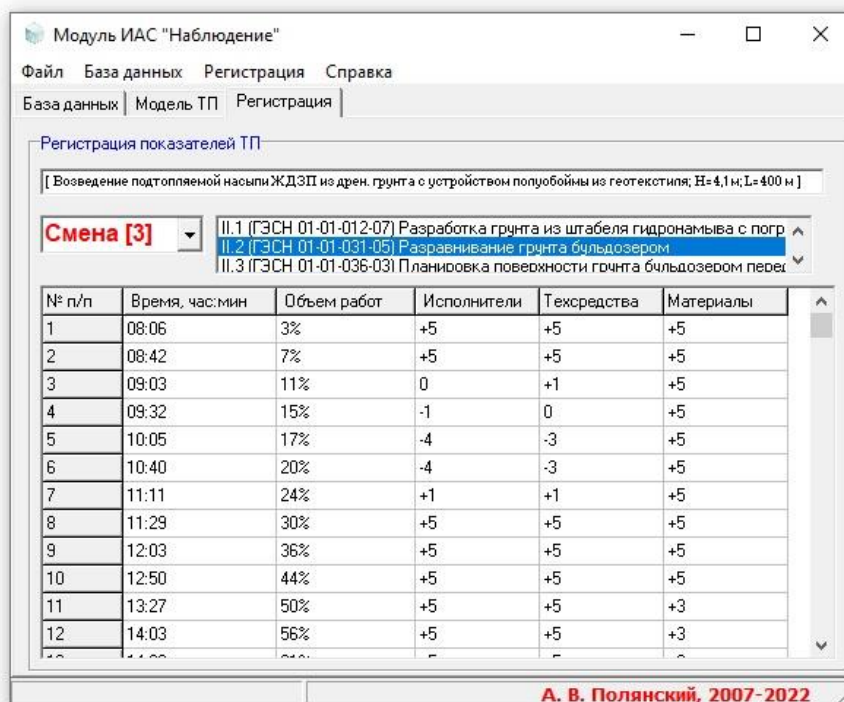


Рисунок 4. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Наблюдение» (разработано автором)

Figure 4. A fragment of the IAS «Observation» software module operation (developed by the author)

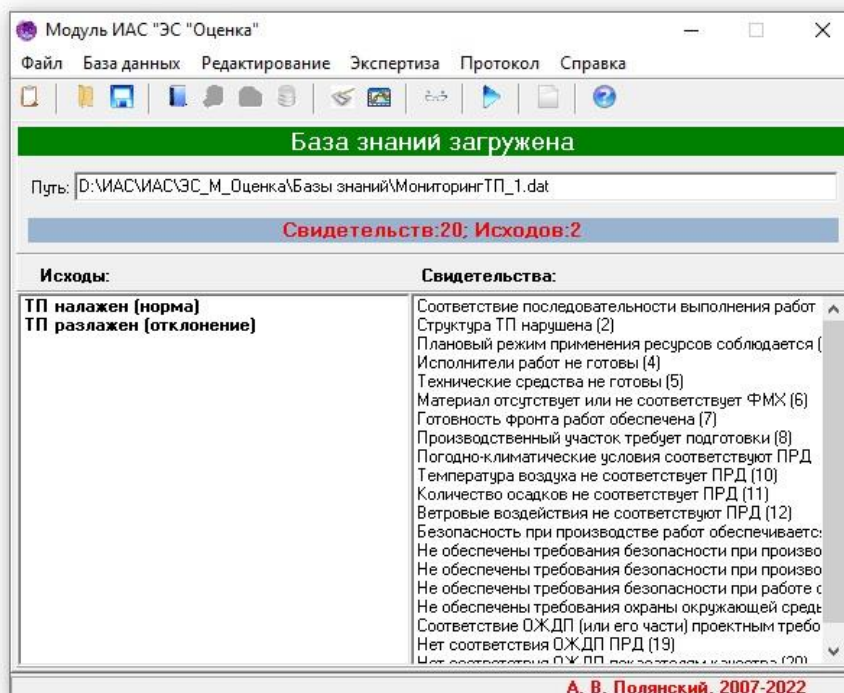


Рисунок 5. Фрагмент работы программного модуля ИАС «ЭС «Оценка», режим «База знаний» (разработано автором)

Figure 5. A fragment of the software module Informational Automation System «Expert System «Evaluation» operation, «Knowledge Base» mode (developed by the author)

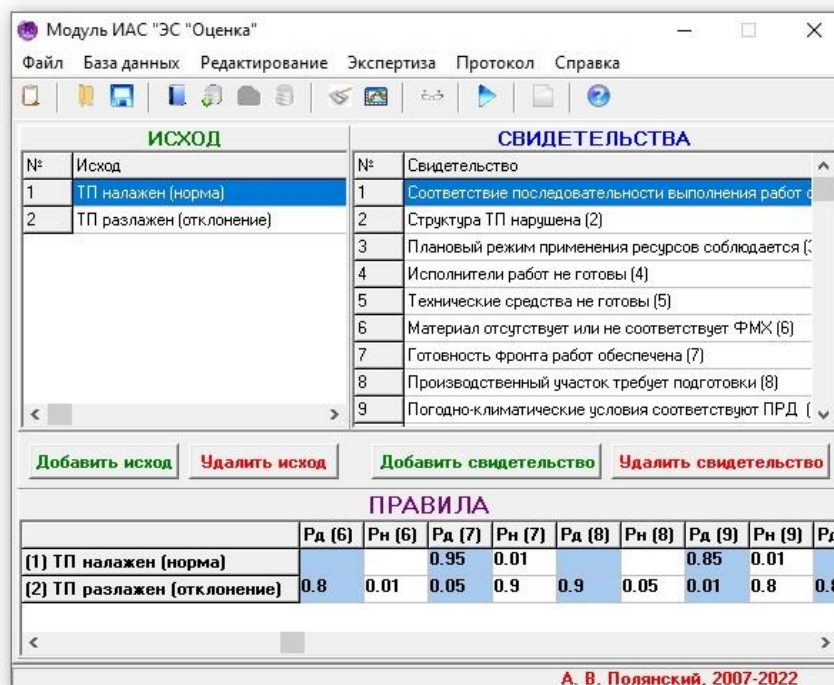


Рисунок 6. Фрагмент работы программного модуля ИАС «ЭС «Оценка», режим «Создание/Редактирование базы знаний» (разработано автором)

Figure 6. Fragment of the program module of the Informational Automation System «Expert System «Evaluation», the «Create/Edit knowledge base» mode (developed by the author)

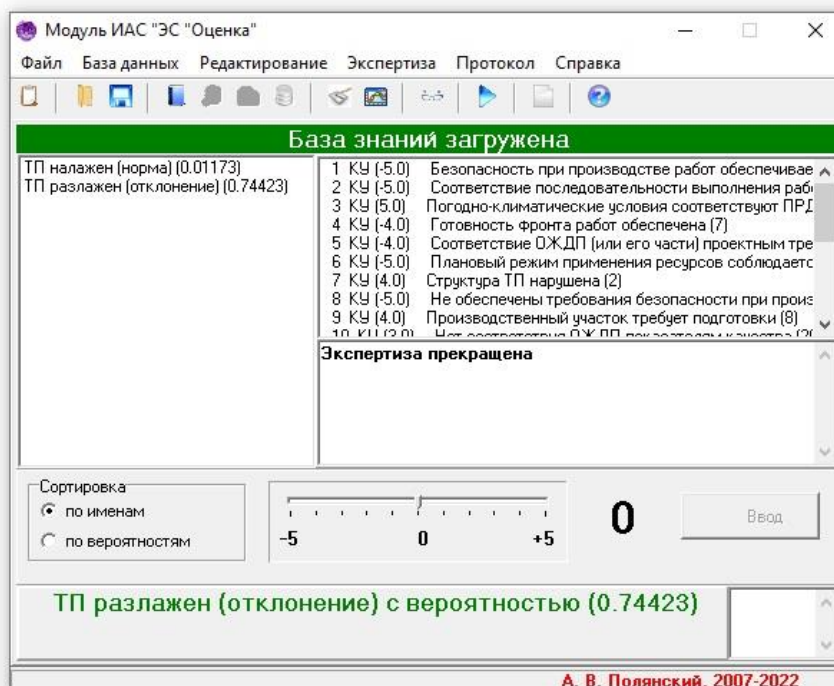


Рисунок 7. Фрагмент работы программного модуля ИАС «ЭС «Оценка», режим «Экспертиза» (разработано автором)

Figure 7. A fragment of the software module Informational Automation System «Expert System «Evaluation» operation, «Expertise» mode (developed by the author)

Оценка реализации ТП возведения насыпи осуществляется на основе правил, хранящихся в БЗ «Оценка». Например:

ТП налажен (норма), 0.50000, 1,0.9,0.01, 3,0.8,0.15, 7,0.95,0.01, 9,0.85,0.01, 13,0.9,0.01, 18,0.8,0.01.

В записи содержатся следующие сведения: существует априорная вероятность $P = 0,5$ того, что оцениваемый ТП возведения насыпи реализуется в соответствии с проектными требованиями, т. е. «ТП налажен (норма)». Первому свидетельству (вопросу) ($i = 1$) соответствует запись «1,0.9,0.01».

Здесь $P_{дi1} = 0,9$, означает, что, если ТП соответствует проектным требованиям, то вероятность ответа «Да» на этот вопрос составит 90 %, а $P_{Hi1} = 0,01$, означает, что, если ТП не соответствует проектным требованиям, то вероятность ответа «Да» составит 1 %.

Ответ «Да» позволяет предположить, что ТП соответствует проектным требованиям.

Ответ «Нет» подтверждает гипотезу о том, что ТП имеет существенные отклонения от запланированных показателей [14].

При положительном ответе «Да» (+5) на первый вопрос апостериорная вероятность для рассматриваемого примера составит (7):

$$P_{АПC} = \frac{0,9 \cdot 0,5}{0,9 \cdot 0,5 + 0,01 \cdot (1 - 0,5)} = 0,99.$$

При отрицательном ответе «Нет» (-5) на первый вопрос апостериорная вероятность для рассматриваемого примера составит (8):

$$P_{АПC} = \frac{(1 - 0,9) \cdot 0,5}{(1 - 0,9) \cdot 0,5 + (1 - 0,01) \cdot (1 - 0,5)} = 0,09.$$

При ответе «Не определено» (0) апостериорная вероятность исхода равна априорной: $P_{АПC} = P_i$.

В случае отсутствия возможности дать определенный (четкий) ответ можно воспользоваться числовым значением h — расположенным на интервалах от -5 («Нет») до 0 и от 0 до +5 («Да»).

Тогда расчет апостериорной вероятности будет осуществляться по формулам (9) и (10).

Например, при ответе $h = -3$:

$$P_{АПС}^* = 0,5 + (0,5 - 0,09) \cdot \frac{-3}{5} = 0,254.$$

Или при ответе $h = +3$:

$$P_{АПС}^* = 0,5 + (0,99 - 0,5) \cdot \frac{3}{5} = 0,794.$$

Следует отметить, что при большом количестве свидетельств (вопросов) нет необходимости в правилах перечислять их все, тем более, если ответ на какой-либо вопрос не влияет на вероятность данного исхода.

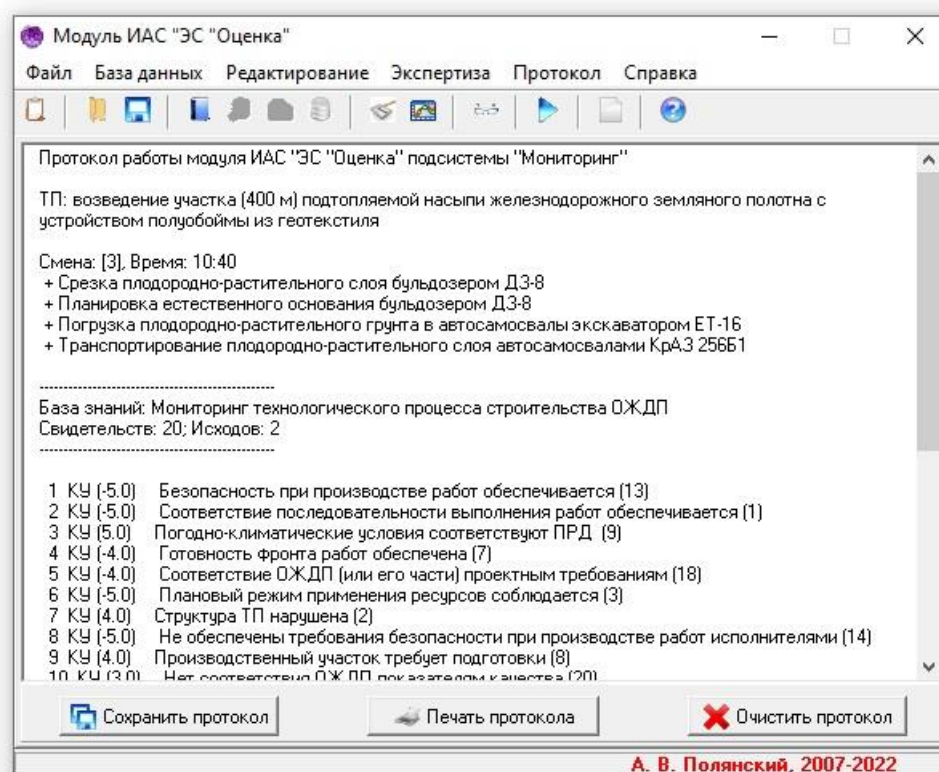


Рисунок 8. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Оценка», режим «Протокол работы ЭС» (разработано автором)

Figure 8. A fragment of the Informational Automation System software module «Assessment» operation, the «Expert System operation protocol» mode (developed by the author)

ТП возведения подтопляемой насыпи для смены № 3 оценивается состоянием «ТП разлажен (отклонение) (0,74423)», то есть не соответствует проектным требованиям с вероятностью 74 %.

Прогноз реализации ТП осуществлен по данным регистрации показателей реализации ТП и его оценки с привлечением математического аппарата теории случайных процессов в модуле ИАС «Прогноз» (рис. 9).

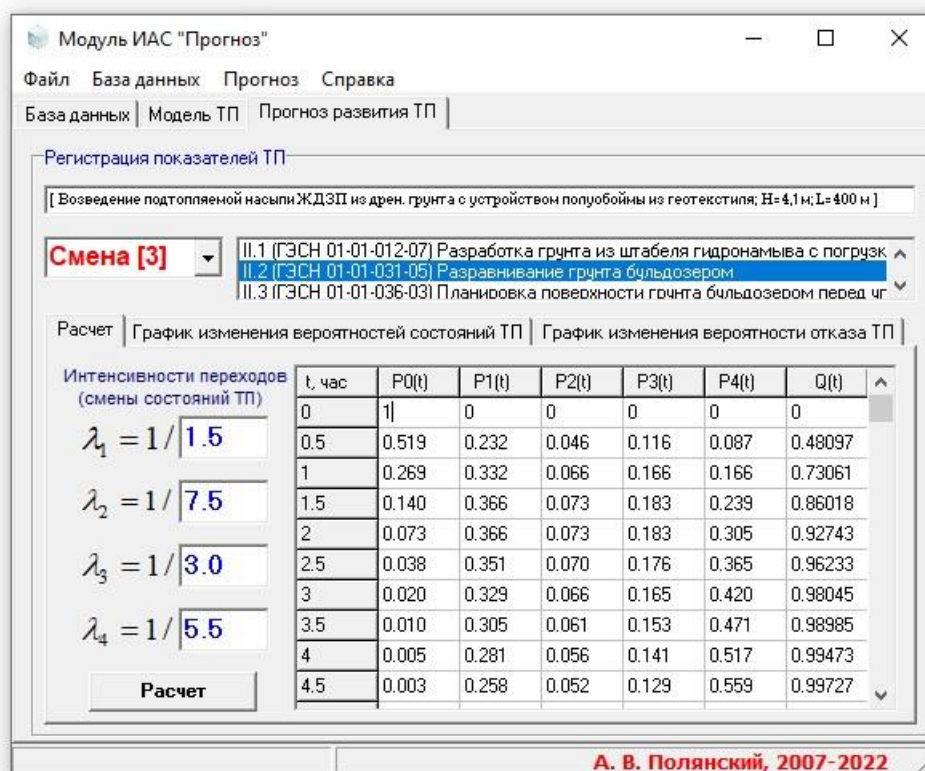


Рисунок 9. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Прогноз», режим «Прогноз развития ТП-Расчет» (разработано автором)

Figure 9. A fragment of the program module Informational Automation System «Forecast» work, «Forecast of the development of TP-Calculation» mode (developed by the author)

В таблице 1 представлены результаты расчетов, выполненные в численном виде с применением системы дифференциальных уравнений (14) методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Определены вероятности состояний ТП строительства ОЖДП на временном интервале $t = 8$ час (смена) с получасовым шагом.

Для расчета были использованы следующие исходные данные (1/час):

$$\lambda_1 = \frac{1}{1,5}, \lambda_2 = \frac{1}{7,5}, \lambda_3 = \frac{1}{3}, \lambda_4 = \frac{1}{5,5}.$$

На рисунке 10 показан фрагмент работы программного модуля ИАС «Прогноз» режим «Прогноз развития ТП — График изменения вероятностей состояний ТП».

На рисунке 11 в графической форме показано изменение значений вероятностей состояний ТП строительства ОЖДП в соответствии с ранее выполненным расчетом (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Значения вероятностей состояний технологического процесса
строительства объекта железнодорожного пути (на примере возведения ЖДЗП)

Probability value of the technological process states of railway
facility construction (on the example of a railway line construction)

t , час / t , hour	$P_0(t)$	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$
0	1	0	0	0	0
0,5	0,519	0,232	0,046	0,116	0,087
1	0,269	0,332	0,066	0,166	0,166
1,5	0,140	0,366	0,073	0,183	0,239
2	0,073	0,366	0,073	0,183	0,305
2,5	0,038	0,351	0,070	0,176	0,365
3	0,020	0,329	0,066	0,165	0,420
3,5	0,010	0,305	0,061	0,153	0,471
4	0,005	0,281	0,056	0,141	0,517
4,5	0,003	0,258	0,052	0,129	0,559
5	0,001	0,236	0,047	0,118	0,597
5,5	0,001	0,216	0,043	0,108	0,632
6	0	0,197	0,039	0,099	0,664
6,5	0	0,180	0,036	0,090	0,693
7	0	0,165	0,033	0,082	0,720
7,5	0	0,150	0,030	0,075	0,744
8	0	0,137	0,027	0,069	0,766

Составлено автором / Compiled by the author

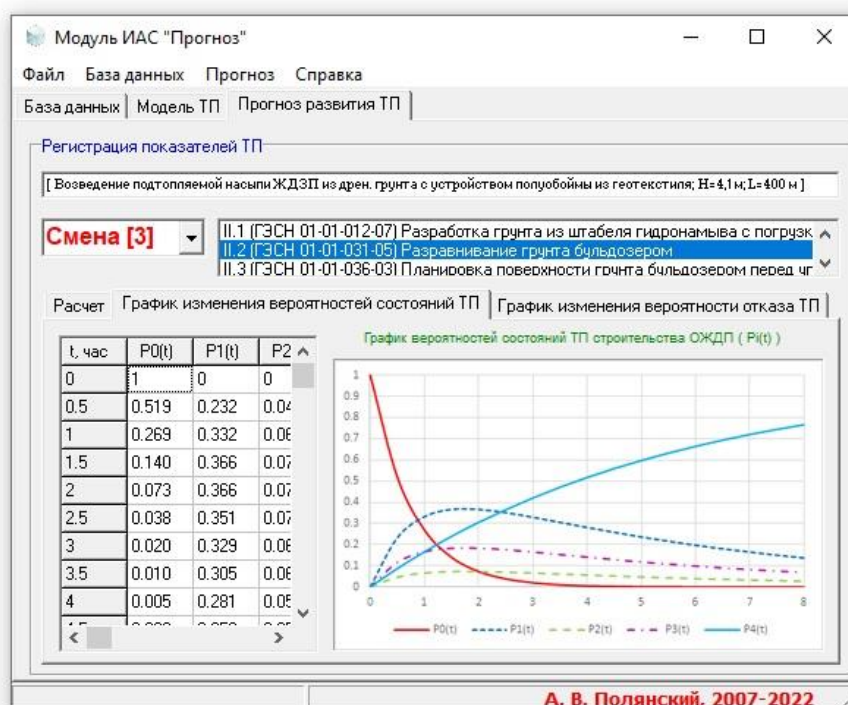


Рисунок 10. Фрагмент работы программного модуля
ИАС «Прогноз», режим «Прогноз развития ТП — График изменения
вероятностей состояний ТП» (разработано автором)

Figure 10. A fragment of the Informational Automation System software module
«Forecast» operation, «Development forecast of technological process — Graph of changes
in the probabilities of technological process states» mode (developed by the author)

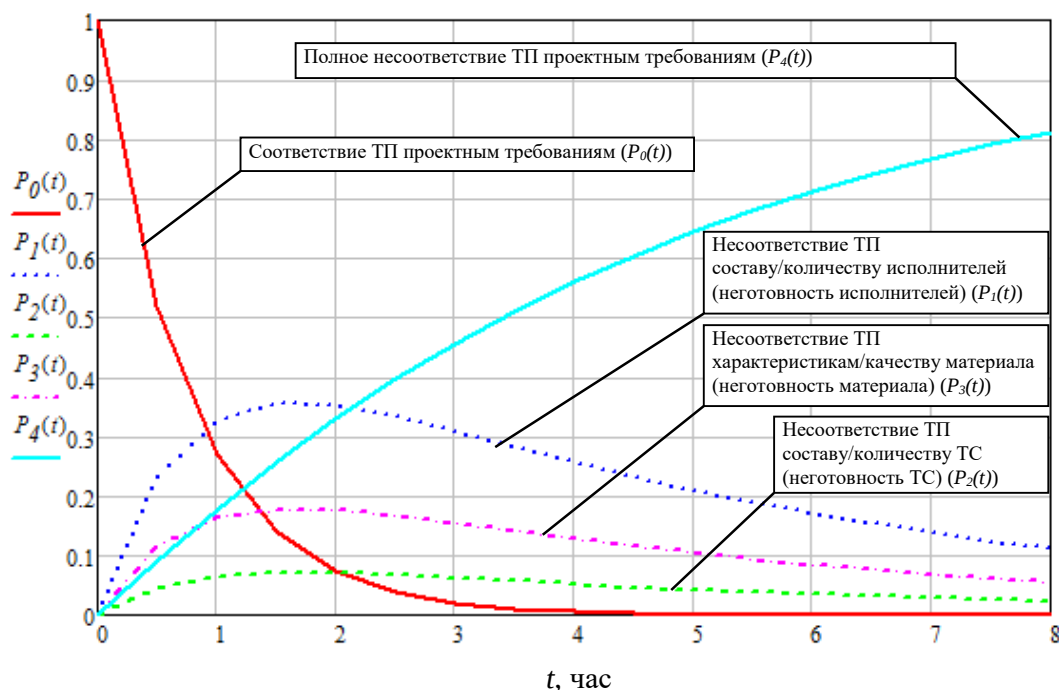


Рисунок 11. График изменения значений вероятностей состояний технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 11. Graph of the change in the probabilities values of the technological process states of railway track facility construction (developed by the author)

В таблице 2 представлены результаты расчета значений вероятностей отказа ТП строительства ОЖДП. Для расчета использована формула (16).

Таблица 2 / Table 2

Значения вероятностей отказа технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (на примере возведения ЖДЗП)

Failure probabilities values of the technological process of railway facility construction (on the example of the construction of a railway line)

t	$Q(t)$	t	$Q(t)$	t	$Q(t)$	t	$Q(t)$
0,5	0,48097	2,5	0,96233	4,5	0,99727	6,5	0,99980
1	0,73061	3	0,98045	5	0,99858	7	0,99990
1,5	0,86018	3,5	0,98985	5,5	0,99926	7,5	0,99995
2	0,92743	4	0,99473	6	0,99962	8	0,99997

Составлено автором / Compiled by the author

На рисунке 12 показан фрагмент работы программного модуля ИАС «Прогноз» режим «Прогноз развития ТП — График изменения вероятности отказа ТП».

На рисунке 13 в графической форме показано изменение значений вероятностей отказа ТП строительства ОЖДП в соответствии с ранее выполненным расчетом.

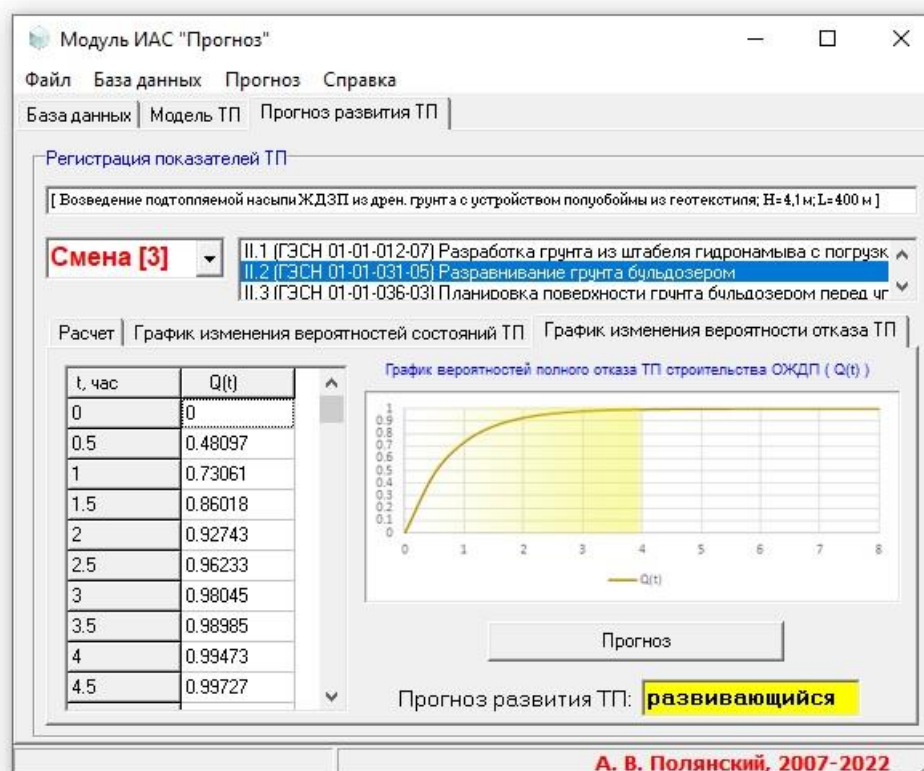


Рисунок 12. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Прогноз», режим «Прогноз развития ТП — График изменения вероятности отказа ТП» (разработано автором)

Figure 12. A fragment of the Informational Automation System «Forecast» software module operation, «Development forecast of the technological process — Graph of the change in the probability of the technological process failure» mode (developed by the author)

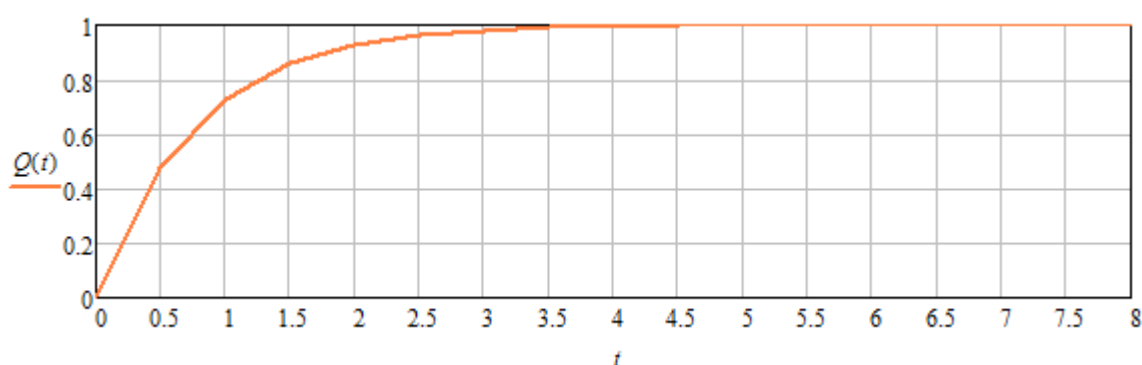


Рисунок 13. График изменения вероятности отказа технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 13. Graph of the change in the technological process failure probability of railway track facility construction (developed by the author)

На основе полученных результатов было установлено, что прогноз реализации ТП подтопленной насыпи определяется состоянием «Развивающийся» (таблица 2, выделено цветом), то есть вероятна реализация ТП на горизонте трех последующих смен как в сторону

соответствия плановым показателям, так и сторону отклонения от них. Это возможно, например, в том случае, когда проектными условиями предусмотрено использование определенного ресурса, а его готовность к началу работ (смены) низкая, однако, ведутся интенсивные работы, направленные на повышение готовности ресурса [4].

В целом мониторинг реализации ТП предполагает периодический сбор сведений по каждой работе (ПТП), входящей в ТП и осуществляемой в определённую смену.

Заключение

Conclusion

В статье рассмотрены теоретические результаты исследования и возможности практического применения мониторинга процессов производства работ в железнодорожном строительстве с применением экспертной системы.

В рамках формирования методологии ИИОТП ЖДС была разработана система мониторинга реализации ТП строительства ОЖДП. Целевым назначением мониторинга является улучшение технологического обоснования и управления ЖДС, а также повышение эффективности строительства ОЖДП. Для этого разработаны расчетные и расчетно-логическая модели положенные в основу автоматизированных и интеллектуального режимов для решения таких задач как:

- регистрации показателей реализации ТП во времени;
- оценка реализации ТП строительства ОЖДП с применением ЭС на базе вероятностного логического вывода;
- прогнозирование реализации ТП построенное на теории марковских случайных процессов.

Указанные модели легли в основу разработанных экспериментальных программных модулей подсистемы ИАС: «Мониторинг». Практическое применение модулей для строительства участка подтопленной насыпи ЖДЗП позволило обеспечить периодический контроль реализации ТП в меняющихся условиях производства работ с целью последующего принятия решений, направленных на обеспечение плановых показателей деятельности СПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Полянский, А.В.** Интеллектуализация мониторинга и регулирования реализации технологических процессов в железнодорожном строительстве / А.В. Полянский. — DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS322> // Транспортные сооружения. — 2022. — Т 9. — № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS322.pdf>. — EDN WLWSGL (дата обращения: 07.11.2022).
2. **Polyanskiy, A.** Stages of Intellectualization of Engineering and Technical Support of Railway Construction / A.V. Polyanskiy. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.093> // Transportation Research Procedia. — 2022. — V. 61. — P. 74–581. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522001016> (дата обращения: 15.10.2022).
3. **Охтилев, М.Ю.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. — М. Наука, 2006. — 408 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19586098>. — EDN QMPREP (дата обращения: 15.10.2022).
4. **Полянский, А.В.** Разработка адаптивного цифрового технологического регламента для инженерно-интеллектуального обеспечения строительства объектов железнодорожного пути / А.В. Полянский. — DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS122> // Транспортные сооружения. — 2022. — Т 9. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS122.pdf>. — EDN HJQBQX (дата обращения: 14.12.2022).
5. **Behnam, A.** Automated progress monitoring system for linear infrastructure projects using satellite remote sensing / A. Behnam, D.C. Wickramasinghe, M.A.A. Ghaffar, T.T. Vu, Y.H. Tang, H.B.M. Isa. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.002> // Automation in Construction. — 2016. — V. 68. — P. 114–127. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580516300826> (дата обращения: 27.10.2022).
6. **Pučko, Z.** Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans / Z. Pučko, N. Šuman, D. Rebolj. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.06.001> // Advanced Engineering Informatics. — 2018. — V. 38. — P. 27–40. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034617305086> (дата обращения: 20.09.2022).
7. **Naticchia, B.** A monitoring system for real-time interference control on large construction sites / B. Naticchia, M. Vaccarini, A. Carbonari. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.016> // Automation in Construction. — 2013. — V. 29. — P. 148–160. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580512001689> (дата обращения: 13.09.2022).
8. **Kim, C.** 4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring / C. Kim, B. Kim, H. Kim. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.03.005> // Automation in Construction. — 2013. — V. 35. — P. 44–52. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580513000332> (дата обращения: 02.09.2022).
9. **Omar, T.** Data acquisition technologies for construction progress tracking / T. Omar, M.L. Nehdi. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.016> // Automation in Construction. — 2016. — V. 70. — P. 143–155. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580516301376> (дата обращения: 27.09.2022).
10. **Alizadehsalehi, S.** The Impact of Field Data Capturing Technologies on Automated Construction Project Progress Monitoring / S. Alizadehsalehi, I. Yitmen. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.504> // Procedia Engineering. — 2016. — V. 161. — P. 97–103. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816327126> (дата обращения: 07.09.2022).
11. **Соколов, Ф.Г.** Контроль качества железнодорожного строительства: Справочник / Ф.Г. Соколов, А.Е. Вичеревин — М.: Транспорт, 1982. — 399 с.
12. **Полянский А.В.** Интеллектуальные подходы к разработке рациональных организационно-технологических решений в транспортном строительстве / А.В. Полянский // Транспортное строительство. — 2013. — № 10. — С. 13–15.
13. **Завадскас, Э.-К.** Системотехническая оценка технологических решений строительного производства / Э.-К. Завадскас. — Л.: Стройиздат, 1991. — 256 с.
14. **Нейлор, К.** Как построить свою экспертную систему / К. Нейлор. — Перевод с англ. Н.Н. Слепова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 288 с.

15. Джарратано, Д. Экспертные системы. Принципы разработки и программирование / Д. Джарратано, Г. Райли. — М.: Вильямс, 2007. — 1147 с.
16. Полянский, А.В. Адаптация интеллектуальных технологий к решению задач календарно-ресурсного планирования строительства транспортных объектов / А.В. Полянский // Механизация строительства. — 2014. — № 4. — С. 58–61. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21429249>. — EDN SAYISV (дата обращения: 23.11.2022).
17. Feng, E. Fuzzy expert system for real-time process condition monitoring and incident prevention / E. Feng, H. Yang, M. Rao. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00053-0) // Expert Systems with Applications. — 1998. — V. 15. — № 3–4. — P. 383–390. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417498000530> (дата обращения: 23.11.2022).
18. Lyu, J. Automated visual inspection expert system for multivariate statistical process control chart / J. Lyu, M. Chen. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.047> // Expert Systems with Applications. — 2009. — V. 36. — № 3, Part 1. — P. 5113–5118. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417408003205> (дата обращения: 18.11.2022).
19. Нейман, А.О. Системное управление ресурсопотоками строительных процессов: Монография / А.О. Нейман. — М.: Маршрут, 2006. — 140 с.
20. Xu, Q. Collaborative information integration for construction safety monitoring / Q. Xu, H.Y. Chong, P.C. Liao. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.004> // Automation in Construction. — 2019. — V. 102. — P. 120–134. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580518304035> (дата обращения: 17.12.2022).

Сведения об авторах:

Полянский Алексей Викторович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: polal_82@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AFJ-6625-2022>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57459964000>

Статья получена: 21.02.2023. Принята к публикации: 19.04.2023. Опубликовано онлайн: 03.05.2023.

REFERENCES

1. Polyanskiy A.V. Intellectualization of monitoring and regulation of the technological processes implementation in railway construction. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; 9(3): 05SATS322. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS322>.
2. Polyanskiy A. Stages of Intellectualization of Engineering and Technical Support of Railway Construction. *Transportation Research Procedia*. 2022; 61: 74–581. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.093>.
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. [Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects]. Moscow: Nauka; 2006. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19586098> (accessed 15th October 2022). (In Russ.).
4. Polyanskiy A.V. Adaptive digital technological regulations development for engineering and intellectual support for the railway track facilities construction. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; 9(1): 03SATS122. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS122>.
5. Behnam A., Wickramasinghe D.C., Ghaffar M.A.A., Vu T.T., Tang Y.H., Isa H.B.M. Automated progress monitoring system for linear infrastructure projects using satellite remote sensing. *Automation in Construction*. 2016; 68: 114–127. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.002>.
6. Pučko Z., Šuman N., Rebolj D. Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans. *Advanced Engineering Informatics*. 2018; 38: 27–40. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.06.001>.

7. Naticchia B., Vaccarini M., Carbonari A. A monitoring system for real-time interference control on large construction sites. *Automation in Construction*. 2013; 29: 148–160. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.016>.
8. Kim C., Kim B., Kim H. 4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring. *Automation in Construction*. 2013; 35: 44–52. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.03.005>.
9. Omar T., Nehdi M.L. Data acquisition technologies for construction progress tracking. *Automation in Construction*. 2016; 70: 143–155. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.016>.
10. Alizadehsalehi S., Yitmen I. The Impact of Field Data Capturing Technologies on Automated Construction Project Progress Monitoring. *Procedia Engineering*. 2016; 161: 97–103. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.504>.
11. Sokolov F.G., Vicherevin A.E. Kontrol' kachestva zheleznodorozhnogo stroitel'stva: Spravochnik [Railway Construction Quality Control: A Handbook]. Moscow: Transport Publ.; 1982. (In Russ.).
12. Polyanskiy A.V. Intellekturnyye podkhody k razrabotke ratsional'nykh organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy v transportnom stroitel'stve [Intelligent approaches to the development of rational organizational and technological solutions in transport construction]. *Transport construction*. 2013; (10): 13–15. (In Russ.).
13. Zavadskas, E.-K. Sistemotekhnicheskaya otsenka tekhnologicheskikh resheniy stroitel'nogo proizvodstva [System-technical evaluation of technological solutions of construction industry]. Leningrad: Stroyizdat; 1991. (In Russ.).
14. Naylor C. Build your own expert system. Wilmslow: Sigma Technical Press; 1983. (In Eng.).
15. Giarratano J.C., Riley G. Expert systems: principles and programming. Boston: Thomson Course Technology; 2005. (In Eng.).
16. Polyanskiy A.V. Adaptation of Intelligent Technologies to The Decision of Problems of Scheduling and Resource Planning Construction of Transport Objects. *Mechanization in construction*. 2014; (4): 58–61. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21429249> (accessed 23rd November 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
17. Feng E., Yang H., Rao M. Fuzzy expert system for real-time process condition monitoring and incident prevention. *Expert Systems with Applications*. 1998; 15(3–4): 383–390. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00053-0).
18. Lyu J., Chen M. Automated visual inspection expert system for multivariate statistical process control chart. *Expert Systems with Applications*. 2009; 36 (3, Part 1): 5113–5118. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.047>.
19. Neyman A.O. Sistemnoye upravleniye resursopotokami stroitel'nykh protsessov: Monografiya [System management of resource flows of construction processes: Monograph]. Moscow: Marshrut; 2006. (In Russ.).
20. Xu Q., Chong H.Y., Liao P.C. Collaborative information integration for construction safety monitoring. *Automation in Construction*. 2019; 102: 120–134. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.004>.

Information about the authors:

Aleksey V. Polyanskiy — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: polal_82@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AFJ-6625-2022>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57459964000>

Submitted: 21st February 2023. Revised: 19th April 2023. Published online: 3rd May 2023.