

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

2022, №3, Том 9 / 2022, N 3, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-3-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS322.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS322 (<https://doi.org/10.15862/05SATS322>)

## Интеллектуализация мониторинга и регулирования реализации технологических процессов в железнодорожном строительстве

Полянский А.В.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Полянский Алексей Викторович, e-mail: [polal\\_82@mail.ru](mailto:polal_82@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены теоретические положения и практические возможности осуществления мониторинга и регулирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением методов и средств искусственного интеллекта. Железнодорожное строительство как сложная динамическая система, требует определенных затрат ресурсов на свое обслуживание. В этих условиях решающее значение приобретает эффективный контроль над технологией производства строительных работ. 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, росту трудозатрат, себестоимости, увеличению продолжительности и, как следствие, ухудшению эксплуатационных характеристик объекта железнодорожного пути. Во избежание такого развития событий необходим оперативный пересмотр принятых технологических решений. Для этого в рамках формирования методологии инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов железнодорожного строительства разработана система мониторинга и регулирования производства работ.

Интеллектуализация мониторинга реализации технологического процесса заключается в применении на этапе его оценки экспертной системы, построенной на вероятностной модели логического вывода. Основным предназначением системы является обработка результатов наблюдения за ходом производства работ при строительстве объекта железнодорожного пути. Данные, полученные на этапе оценки, служат основой для прогноза реализации технологического процесса. Сущность прогноза опирается на решение общих методологических вопросов применения марковских случайных процессов.

Регулирование реализации процесса опирается на результаты мониторинга. Настройка технологического процесса под меняющиеся условия производства работ обеспечивает гибкость строительству объектов железнодорожного пути. Это достигается путем оперативного принятия решений с применением возможностей искусственной нейронной сети и последующей корректировкой хода работ. На основе результатов теоретического исследования в статье представлены практические аспекты реализации мониторинга и регулирования производства работ в железнодорожном строительстве с применением интеллектуальных технологий на примере возведения участка подтопляемой насыпи железнодорожного земляного полотна.

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

**Ключевые слова:** железнодорожное строительство; технологический процесс; объект железнодорожного пути; методы искусственного интеллекта; мониторинг; экспертная система; регулирование; искусственная нейронная сеть

## Intellectualization of monitoring and regulation of the technological processes implementation in railway construction

Aleksey V. Polyanskiy

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Aleksey V. Polyanskiy, e-mail: [polal\\_82@mail.ru](mailto:polal_82@mail.ru)

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

The deviations occurrence from planned requirements during construction work, due to the stochastic nature of railway construction, leads to violations of technology, an increase in labor costs, prime cost, an increase in duration, and as a result, a deterioration in the operational railway facility characteristics. To avoid such a development of events, a prompt review of the adopted technological solutions is necessary. To this end, within the scope of the methodology formation for engineering and intellectual support of railway construction technological processes, a system for monitoring and regulating work production has been developed.

Intellectualization of monitoring the technological process implementation consists of the use of an expert system at the evaluation stage, built on a probabilistic inference model. The main purpose of the system is to process the monitoring results of the work progress during the railway track facility construction. The data obtained at the evaluation stage serve as the basis for predicting the implementation of the technological process. The essence of the forecast is based on the solution of general methodological issues of applying Markov processes.

The regulation of the process implementation is based on the monitoring results. Adjusting the technological process to changing conditions of work provides flexibility in railway track facilities construction. This is achieved through rapid decision-making using the capabilities of an artificial neural network and subsequent adjustment of the work progress. Based on the theoretical study results, the article presents the practical aspects of monitoring and regulating the production of works in railway construction using intelligent technologies by the example of the construction of a flooded embankment section of a railway subgrade.

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

**Keywords:** railway construction; technological process; railway track object; artificial intelligence methods; monitoring; expert system; regulation; artificial neural network

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

Эффективность строительного производства зависит в основном от уровня комплексной механизации и автоматизации, степени индустриализации и специализации, мощности используемых технических средств, а также качества разработки и реализации технологических процессов (ТП). Современное железнодорожное строительство (ЖДС) характеризуется достаточно высоким уровнем комплексной механизации, индустриализации и специализации.

В области технологии и организации строительства железных дорог стоят очень большие задачи в первую очередь по разработке научно обоснованных методов автоматизированного технологического проектирования производства, пользуясь которыми разработчики организационно-технологической документации (ОТД) могли бы находить гарантированно оптимальные решения сложных многовариантных задач.

В этих условиях наибольшие резервы повышения эффективности производства работ следует искать в улучшении контроля технологии и организации строительства объектов железнодорожного пути (ОЖДП). Это можно осуществить путем модернизации действующей системы инженерно-технического сопровождения ЖДС за счет внедрения подсистемы инженерно-интеллектуального обеспечения ТП (ИИОТП) строительства ОЖДП [1].

Одной из задач ИИОТП является эффективное применение автоматизированных систем с элементами искусственного интеллекта (ИИ), то есть систем, использующих не только вычислительные процедуры, но и логические, близкие человеческому мышлению [1–3]. А основной целью использования таких систем является получение завершеного строительством ОЖДП в установленные сроки, запланированными себестоимостью и трудозатратами. Этому должна предшествовать разработка рационального ТП, обеспеченного материально-техническими ресурсами.

В задачу разработки ТП строительства ОЖДП должны входить: выполнение оптимального расчета общей последовательности производства работ (простых технологических процессов (ПТП)), определение темпов частных и комплексных потоков, согласование подготовительных и вспомогательных работ с основными работами, рациональное использование строительных машин, транспортных средств и т. п. [4; 5].

Известно, что как бы хорошо ни был разработан ТП, при неправильной его реализации, без постоянного контроля и оперативного регулирования достичь высокого экономического эффекта практически невозможно. Отсюда следует, что контролю и регулированию реализации ТП должно быть уделено не меньше внимания, чем его разработке [6].

Все это определяет в рамках научно-исследовательской деятельности важную и ответственную задачу всемерно содействовать разработке методов и приемов, позволяющих принимать наилучшие решения в области контроля и регулирования ТП строительства ОЖДП. Разработки в области автоматизации методов и средств контроля состояния объектов и процессов способствовали проведению научных исследований в области создания систем строительного мониторинга, в частности мониторинга реализации ТП строительства ОЖДП.

Цифровизация строительной деятельности определила возможности для внедрения средств ИИ в решение задач мониторинга и регулирования реализации ТП. Использование средств ИИ делает возможным применение системы мониторинга и регулирования реализации ТП в автоматизированном режиме. Основными решаемыми задачами здесь будут [7–9]:

- регистрация параметров реализации ТП;
- оценка реализации ТП;
- прогноз реализации ТП;
- выбор регулирующего решения по результатам мониторинга реализации ТП;
- регулирование реализации ТП.

Однако решение перечисленных задач потребовало использования<sup>1</sup> как расчетных (основанных только на расчетных операциях) моделей, так и создания расчетно-логических (основанных на совместном использовании расчетных и логических операций). Это объясняется тем, что существующие расчетные модели в большей степени ориентированы на вычислительные операции при реализации методов анализа и принятия решений, чем на реализацию эвристических, экспертных и др. алгоритмов [2; 3; 7–9].

В то же время сочетание расчетных и расчетно-логических моделей при решении перечисленных задач должно лечь в основу ИИОТП строительства ОЖДП. Таким образом, для решения подобных задач имеет

---

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

смысл использовать симбиоз методов обработки знаний и традиционных математических методов. Такие комплексные задачи не удастся решить только на основе аналитических методов [2; 3; 7–9]. В связи с этим были привлечены методы и средства ИИ, о которых, в частности, пойдет речь в данной статье.

## **1. Теоретические основания создания системы мониторинга и регулирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути**

### **1. Theoretical framework for creating a system for monitoring and regulating the technological process implementation of building a railway facility**

В статье [10] рассматривались вопросы разработки адаптивного цифрового технологического регламента (АЦТР) в рамках ИИОТП строительства ОЖДП. Основной причиной разработки и последующего применения АЦТР явилось то обстоятельство, что в настоящее время сформировался инструментарий для обеспечения взаимосвязи между проектным технологическим процессом (ТПП), полученным на этапе разработки, и фактическим технологическим процессом (ТПФ), реализуемым в ходе строительства ОЖДП.

Распределенный характер модели ИИОТП определяет возможность интеграции АЦТР в существующую систему проектирования и управления строительством ОЖДП.

АЦТР является частью схемы контроля соответствия ТП проектным требованиям, последовательности строительных работ (ПТП), их продолжительности и ресурсообеспеченности. Информация о режимах эксплуатации технических средств, работы исполнителей, условиях выполнения и реконфигурации строительных работ, представленная в АЦТР, является основой для организации контроля и управления ТП. А понимание технологии ЖДС, взаимосвязи работ и ресурсов, их влияния друг на друга — способствует принятию решений для коррекции ТП. АЦТР призван обеспечить исполнителям строительной подрядной организации (СПО) планирование своих действий по регулированию реализации ТП строительства ОЖДП [10].

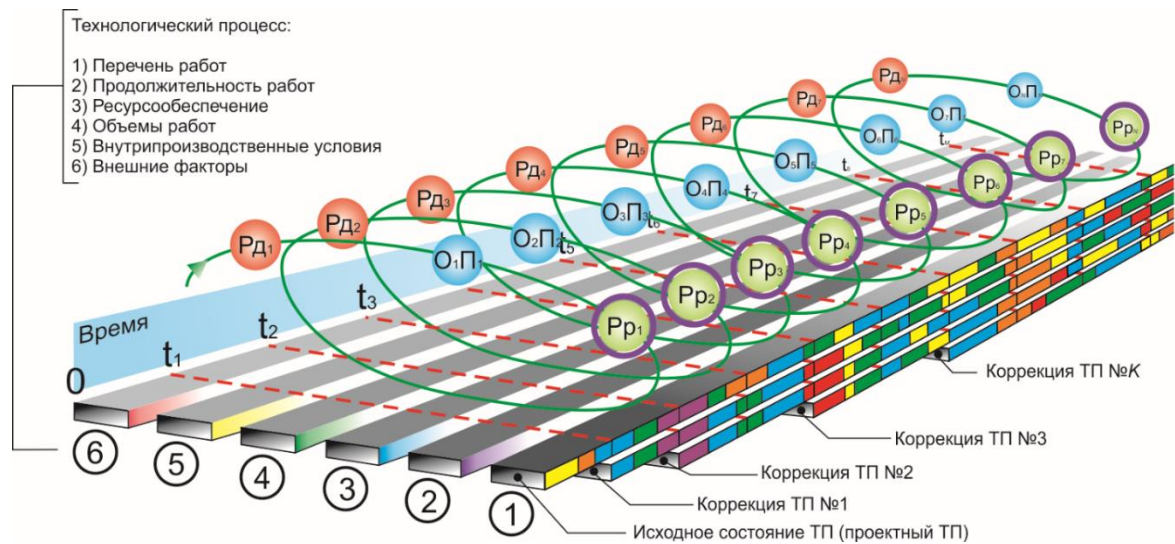
Для регулирования реализации ТП строительства ОЖДП в меняющихся условиях производства работ в АЦТР предусмотрена иерархия подобно устроенных ТП и задания последовательности ПТП в виде технологических сценариев (ТСц). Изменения в ходе производства работ, а также преобразований ресурсов, влекут за собой корректировку



ТСц с последующим изменением значений параметров ТП (вычисляемых и логических). Для этого предусмотрено осуществление двух процедур [1; 10]:

- мониторинга реализации ТП, представляющего собой периодический контроль соответствия текущих ПТП проектным (плановым) показателям с одновременным уточнением текущей потребности в ресурсах;
- регулирования реализации ТП, представляющего собой деятельность, связанную с осуществлением определенных руководящих (инструктивных) воздействий исполнителей СПО на порядок преобразований состояний ресурсов.

Мониторинг и регулирование реализации ТП являются циклическими, то есть на основе результатов, полученных в ходе мониторинга, принимается решение о регулирующем воздействии, затем снова мониторинг и т. д. На рисунке 1 показана схема осуществления основных функций мониторинга и регулирования реализации ТП строительства ОЖДП (регистрации данных, оценки, прогноза и применения регулирующего решения) путем организации циклов во времени в виде раскручивающейся спирали.



*Rd* — регистрация данных, *O* — оценка реализации, *П* — прогноз реализации, *Pp* — регулирующее решение

**Рисунок 1.** Схема функционирования во времени мониторинга и регулирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

*Rd* — data registration, *O* — implementation assessment, *P* — implementation forecast, *PP* — regulatory decision

**Figure 1.** Scheme of functioning in time of technological process implementation monitoring and regulation of railway facility construction (developed by the author)

Корректировка ТСц подразумевает внесение изменений в ТПП с учетом изменившихся условий производства работ и ресурсной оснащенности СПО с привлечением информации из АЦТР. Основу корректировки ТСц составляют регулирующие решения, формируемые с применением экспертных и нейросетевых технологий и положенных в основу подсистем интеллектуальной автоматизированной системы (ИАС): «Мониторинг» (модули «Наблюдение», «ЭС «Оценка», «Прогноз») и «Регулирование» (модули «Решение», «Регулирование»).

## **2. Мониторинг реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением экспертной системы**

### **2. Monitoring of technological process implementation of railway track object construction using an expert system**

Для получения в ходе ЖДС соответствующего проектным требованиям и требованиям безопасности ОЖДП необходимо своевременное регулирование реализации ТП с учетом имеющихся обратных связей. Одним из инструментов установления обратной связи является мониторинг реализации ТП, включающий операции непрерывного наблюдения (измерения) показателей реализации ТП, вычисления значений его характеристик, сравнения полученных значений с проектными (плановыми) значениями, прогноза реализации ТП [11].

Особенностью мониторинга реализации ТП является необходимость оперативной оценки его исполнения во времени. Для этого необходимо иметь данные по его запланированной реализации во времени. Эти данные могут быть получены путем формирования модели ТП. На основе модели ТП создаются хранилище данных и соответствующие инструменты для регистрации показателей и анализа накопленных данных [12].

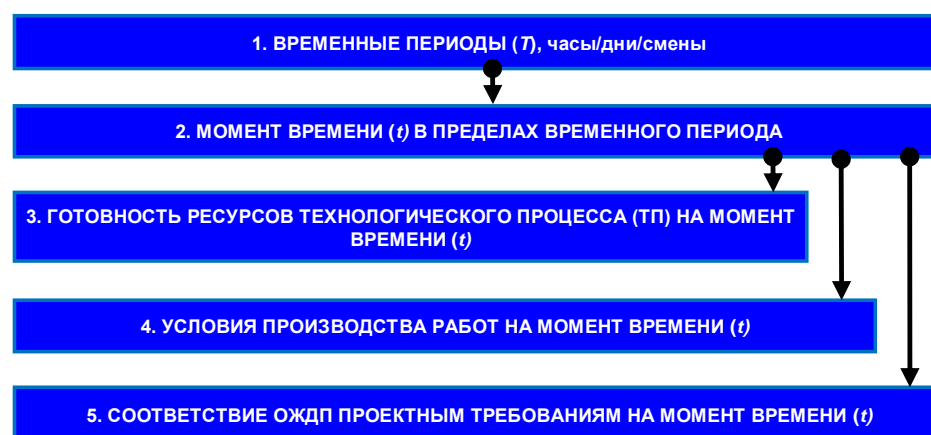
Мониторинг реализации ТП строительства ОЖДП включает выполнение трех основных функций:

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

*Регистрация показателей реализации ТП* может выполняться путем визуальной фиксации или с помощью различных программных и аппаратных решений в определенные моменты времени в пределах временных периодов (часов/смен) [13]. 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). Данные, регистрируемые в ходе реализации ТП, накапливаются и сохраняются в модуле ИАС «Наблюдение».

В рамках проводимого исследования было выделено три группы показателей, представленных на рисунке 2:



*Рисунок 2. Схема наблюдения за реализацией технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)*

*Figure 2. Scheme for technological process implementation monitoring for the railway track facility construction (developed by the author)*

Следующей функцией мониторинга является *оценка реализации ТП*. Учитывая объем данных, получаемых в ходе регистрации показателей реализации ТП, перспективным направлением для их оценки является применение цифровых многоуровневых информационно-справочных систем. Их работа заключается в накоплении определенных данных, так называемых знаний (нормативных, опытных, экспертных), их систематизацию в компьютерной базе знаний (БЗ) с последующей обработкой по ситуации для ее оценки с применением технологии экспертных систем (ЭС) [14].

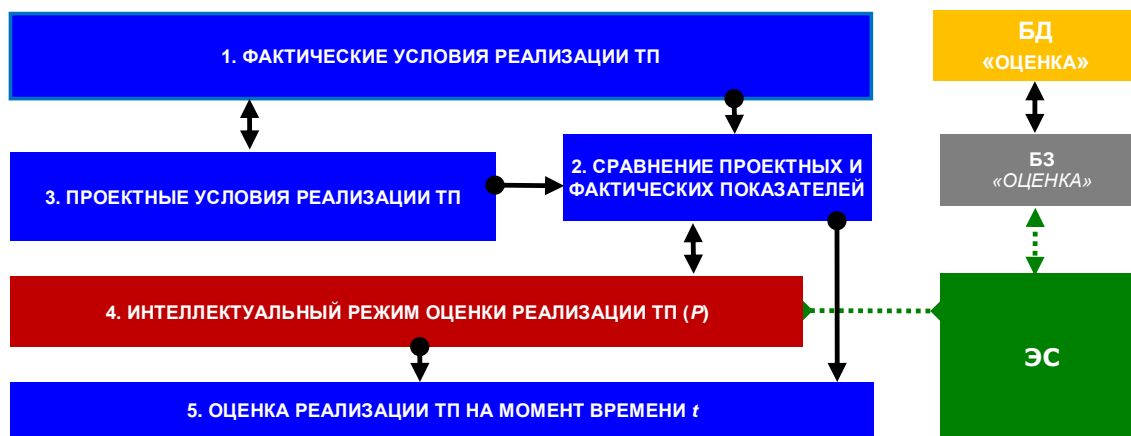
Для оценки реализации ТП строительства ОЖДП разработан модуль «ЭС «Оценка», основу которого составляет ЭС. Основная задача ЭС — помощь СПО в настройке параметров ТП, в оптимизации этой процедуры с учетом погодных-климатических воздействий или изменений, связанных с ресурсным обеспечением строительства. ЭС позволяет анализировать показатели реализации ТП с помощью встроенной системы логического вывода и информировать СПО о ходе производства работ [15].

Оценка реализации ТП относится к категории слабо формализуемых и требует согласованного взаимодействия результатов регистрации показателей ТП с требованиями строительных нормативов. Из-за большого объема поступающей информации (различного свойства) и



необходимости ее оперативной обработки для получения оптимального результата и предлагается к использованию ЭС. При этом особенностью ее устройства является механизмы обратной связи и вывода, основанного на вероятностной байесовской логике [16–18].

На рисунке 3 представлена схема оценки реализации ТП строительства ОЖДП с применением ЭС, положенной в основу модуля ИАС «ЭС «Оценка». 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) [17; 18].



*Рисунок 3. Схема оценки реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением экспертной системы (разработано автором)*

*Figure 3. Scheme for assessing the technological process implementation for the railway facility construction using an expert system (developed by the author)*

Выбор байесовской системы логического вывода и вероятностной МПЗ позволяет разработанной ЭС установить степень уверенности при проведении оценки реализации ТП, учитывая неточные и ненадежные регистрируемые данные. Для этого в ЭС был использован способ «рассуждения» при наличии неопределенности, основанный на теории вероятностей и теореме Байеса, в частности. Применение формулы Байеса позволяет накапливать информацию, поступающую из различных источников, с целью подтверждения/неподтверждения определенной гипотезы [17].

Ответственным этапом, предшествующем применению ЭС для оценки реализации ТП строительства ОЖДП, является подготовка БЗ [17; 18]. Для этого формулируются знания, определяющие варианты оценки реализации ТП и состоящие из двух наборов:  $Q = \{q_i\}$  — набора

свидетельств и  $V = \{v_i\}$  — набора вариантов исхода. Собранная информация структурируется в БЗ по следующей схеме:

$$БЗ = \{Свидетельство № n\}; \{Исход № m, P, [i, P_D, P_H]\}$$

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 (вероятность которого меняется в соответствии с данным правилом), априорную вероятность данного исхода  $P$ ;
- повторяющиеся группы из трёх значений:  $i$  — номер соответствующего свидетельства (показателя реализации ТП),  $P_D$  и  $P_H$  — соответственно вероятности подтверждения этого свидетельства, если возможный исход верен и неверен.

Следует отметить, что при формировании конкретного правила нет необходимости перечислять все имеющиеся свидетельства из перечня, если они не влияют на вероятность данного исхода. Достаточно указать только те, которые с ним связаны [17].

Принципиальная схема работы ЭС предполагает следующий порядок:

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

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.

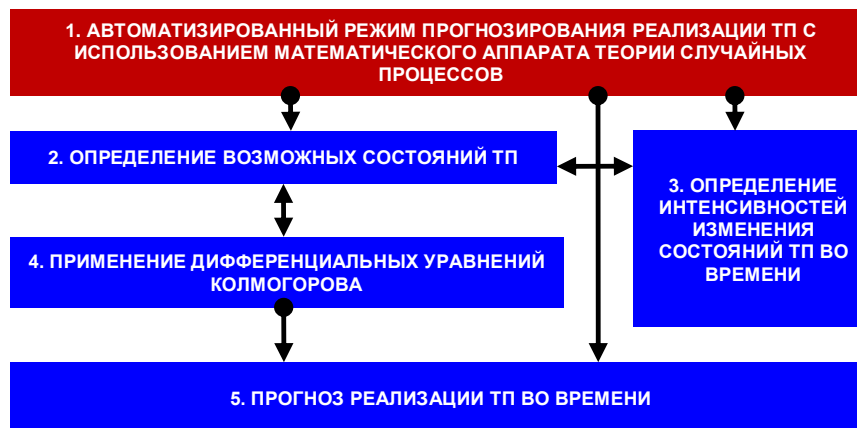
Результат генерируемый ЭС представляет собой совокупность общей оценки реализации ТП (или готовности ресурса) и значения вероятности, определившей данный результат:

- 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,  $P_{РПГ}$ ;
- 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,  $P_{РЧГ}$ ;
- ресурс *не готов*:  $P \in [0;0,90)$  — не обеспечивается соответствие ресурса для реализации ТП проектным требованиям — его использование невозможно, необходима замена,  $P_{РНГ}$ .

*Прогноз реализации ТП*, понимаемый как процедура исследования перспектив производства работ, направленных на строительство ОЖДП, предполагает решение следующих задач:

- установление на основе данных наблюдения и оценки, имеющих место причинно-следственных взаимосвязей параметров реализации ТП во времени;
- обобщение данных наблюдения и оценки с последующим формированием общей прогнозной модели как для известных, так и для ранее не встречавшихся ситуаций;
- обоснование вариантов прогноза реализации ТП на основе моделирования для последующего выбора и применения регулирующего решения;
- непосредственное применение модели для прогноза реализации ТП в автоматизированном режиме.

В связи с тем, что возникающие при реализации ТП ситуации и события носят случайный характер, их изучение для последующего прогнозирования должно опираться на вероятностную основу. Наиболее подходящими здесь будут математические модели теории случайных процессов (СлП). На рисунке 4 представлена схема прогнозирования реализации ТП строительства ОЖДП.



*Рисунок 4. Схема прогнозирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)*

*Figure 4. Scheme for predicting the technological process implementation for the railway track facility construction (developed by the author)*

Для математического описания нескольких операций, развивающихся в форме СлП, может быть с успехом применён математический аппарат, разработанный для марковских СлП. При этом для анализа динамики вероятностных свойств ТП, будет служить простейший поток событий, с дискретными состояниями и непрерывным временем [18; 19].

Для формирования прогнозной модели и получения количественных характеристик прогноза реализации ТП необходимо интерпретировать свойства простейшего потока с целью анализа динамики изменения его состояний. Тогда ТП строительства ОЖДП как объект математического моделирования предполагает следующее:

- под моделью понимается множество элементов ТП (совокупность состояний, интенсивностей переходов), находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующие целостную и единую структуру;
- ТП рассматривается как марковский СлП с дискретными состояниями и непрерывным временем, т. е. переходы из состояния в состояние могут происходить не в фиксированные моменты времени, а в случайные моменты;
- ТП обладает свойствами ординарности, отсутствия последействия и стационарности.

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 —  $\lambda$ , которые отражают среднее число событий простейшего потока наступающих в единицу времени. Интенсивность переходов может быть любой неотрицательной функцией времени и имеет размерность: 1/время.

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

Это, в свою очередь, дает возможность математически описать процедуру прогнозирования реализации ТП и выделить следующие варианты прогноза реализации ТП строительства ОЖДП:

- стабильный прогноз — вероятна реализация ТП в соответствии с проектными требованиями на протяжении рассматриваемого временного периода, например, смены (8 часов);
- развивающийся прогноз — вероятна реализация ТП с частичными отклонениями от проектных требований на протяжении половины рассматриваемого временного периода, например,  $\frac{1}{2}$  смены (4 часа);
- негативный прогноз — вероятна реализация ТП с существенными отклонениями от проектных требований на протяжении менее половины рассматриваемого временного периода, например, менее  $\frac{1}{2}$  смены (меньше 4 часов).

Таким образом, применение представленной модели позволяет получить конкретные значения вероятностей обнаружения несоответствия ТП в зависимости от времени наблюдения. А разработанный на основе теоретического исследования программный модуль ИАС «Прогноз» в



автоматизированном режиме позволяет прогнозировать реализацию ТП строительства ОЖДП.

Данные, полученные в модулях подсистемы ИАС «Мониторинг», передаются в соответствующие разделы АЦТР для последующего уточнения/изменения (при необходимости) ТСц.

### **3. Регулирование реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети**

#### **3. Regulation of the technological process implementation of railway track object construction using an artificial neural network**

В зависимости от результатов мониторинга реализации ТП в ТСц вносятся изменения и принимается решение о корректировке производства работ или их продолжении без осуществления корректирующих воздействий.

Цели регулирования ТП достигаются путем исполнения соответствующего ТСц, в котором сформирована необходимая структура производства работ, настроены технические средства и трудовые ресурсы на требуемые режимы, а также инициируются и контролируются организационные мероприятия [18–20].

Само регулирование состоит в изменении параметров ТП в рамках заданных правил и обеспечивает поддержание постоянства регулируемой величины на некотором определенном уровне на основе взаимосвязи между ресурсами, работами ТП и характеристиками ОЖДП.

Для эффективного регулирования реализации ТП строительства ОЖДП предлагается использовать информацию из ТСц. Здесь важно установить зависимости между параметрами (показателями) ТП и характеристиками свойств ОЖДП. Для описания этой зависимости можно было бы применить линейную (по параметрам) регрессионную модель. Это, по сути, основной метод, использующий известные алгоритмы, описания динамики и оптимизации сложных процессов. Однако в большинстве случаев для процессов (в частности, технологических) линейная аппроксимация неадекватна реальности [21–27].

Для разработки регулирующего решения с учетом особенностей строительства ОЖДП и в условиях изменчивости показателей ТП одним из наиболее эффективных методов является применение искусственной нейронной сети (ИНС) типа *MLP* (*multilayer perceptron* — многослойный перцептрон), обучаемой с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (*back propagation*). ИНС может быть использована для

моделирования взаимосвязи характеристик ОЖДП и (показателей) параметров ТП [22; 23].

Выбор ИНС для решения задачи обусловлен еще и тем, что предусмотреть для ТП регулирующее решение, которое могло бы охватить все возможные производственные ситуации просто невозможно. В связи с этим предлагается обучить ИНС на определенном количестве примеров (вариантах регулирующего решения, привязанного к производственной обстановке). Обученная ИНС будет генерировать регулирующие решения для иных производственных ситуаций, не входящих в набор обучающих [22–24].

Здесь важно отметить, что для решения рассматриваемой задачи также можно применить *RBF*-сеть (*radial basis function network* — сеть радиально-базисных функций), для обучения которой разработаны различные алгоритмы. Основной алгоритм реализует смешанное обучение, состоящее из двух этапов:

- оценки позиции и ширины ядра путем кластеризации «без учителя»;
- минимизации среднеквадратической ошибки «с учителем» для определения весов связей между скрытым и выходным слоями.

Линейность выходных элементов позволяет использовать неитерационный алгоритм. Для уточнения параметров сети (на основе полученного начального приближения) используется итерационный алгоритм — градиентный спуск.

В отличие от алгоритма обратного распространения ошибки, смешанный алгоритм обучения *RBF*-сети сходится значительно быстрее. Но из-за того, что *RBF*-сеть часто содержит слишком много скрытых элементов это приводит к чрезвычайно медленной работе *RBF*-сети, чего не наблюдается при функционировании многослойного персептрона [22; 23].

Преимущества использования *MLP*-сети характеризуются возможностью нелинейного моделирования сложных многомерных систем. А для таких систем характерны постоянно динамически обновляющиеся значительные объёмы информации. В то же время проектирование, обучение и использование ИНС сегодня хорошо представлено в виде алгоритмов и нейросимуляторов. Поэтому решение прикладных задач с применением ИНС под силу даже неспециалисту в области математики и искусственного интеллекта. И наконец ИНС не является строго заданной функцией, определяющей степень влияния СПО на производственную обстановку. Это значит, что даже при небольших

отклонениях в ходе производства работ ИНС может отреагировать по-разному [22; 23].

В рамках проводимого исследования регулирование ТП предлагается осуществлять в два этапа. Первый этап предполагает выбор с применением ИНС регулирующего решения, а второй — его применение.

Процедура *выбора регулирующего решения* предполагает решение задач корректировки хода производства работ и использования ресурсов (трудовых, материальных, технических) с учетом всех ограничений (климатических, бюджетных, временных).

Таблица 1 / Table 1

**Входные данные и выходные параметры для обучения, тестирования и применения искусственной нейронной сети**

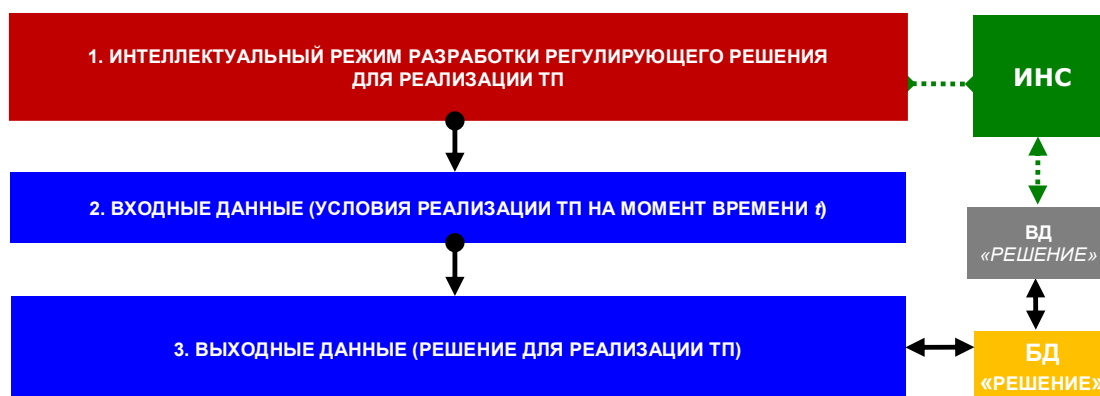
**Input data and output parameters for training, testing, and applying an artificial neural network**

| Категория<br>Category                          | Технологический процесс<br>Technological process   | Ресурсы технологического процесса<br>Technological process resources   |
|--|--|--|
| <b>Входные данные</b><br>Input data            |  |  |
| $X_1$  | Результат оценки реализации ТП + Интервальная принадлежность вероятности результата оценки реализации ТП<br>Assessment result of the technological process implementation + Interval membership of the assessment result probability of the technological process implementation | Результат оценки применения ресурса + Интервальная принадлежность вероятности результата оценки применения ресурса<br>Assessment result of the resource application + Interval membership of the assessment result probability of the resource application |
| $X_2$  | Результат прогноза реализации ТП + Интервальная принадлежность вероятности результата прогноза реализации ТП<br>Forecast result of the technological process implementation + Interval membership of the forecast result probability of the technological process implementation | Результат прогноза применения ресурса + Интервальная принадлежность вероятности результата прогноза применения ресурса<br>Forecast result of the resource application + Interval membership of the forecast result probability of the resource application |
| $X_3$  | Интервальная принадлежность времени до завершения смены<br>Interval membership of time until the end of the shift  | Интервальная принадлежность времени до завершения применения ресурса в смене<br>Interval membership of time until the end of the resource application in the shift   |
| $X_4$  | Интервальная принадлежность времени до завершения ТП<br>Interval membership of the time until the completion of the technological process  | Интервальная принадлежность времени до завершения применения ресурса<br>The interval membership of the time until the end of the resource application  |
| $X_5$  | Интервальная принадлежность выполненного объема работ<br>Interval membership of the amount of work performed   | Интервальная принадлежность выполненного объема работ по ресурсу<br>Interval membership of the amount of work performed by the resource  |
| <b>Выходные параметры</b><br>Output parameters |  |  |
| $Y_i$  | Решение о продолжении или корректировке реализации ТП<br>The decision to continue or adjust the implementation of the technological process  | Решение о продолжении или корректировке применения ресурса<br>The decision to continue or adjust the resource application  |

Составлено автором / Compiled by the author

Формализация задачи разработки решения для регулирования реализации ТП строительства ОЖДП методом нейросетевого моделирования предусматривает применение ИНС типа *feedforward*, позволяющей моделировать взаимосвязи между входными данными (результатами мониторинга) и выходными параметрами (вариантом регулирующего решения). При этом входные данные и выходные параметры рассматриваются для ТП в целом и для каждого из трех видов ресурсов в отдельности (табл. 1). Входные данные являются совокупностью результатов оценки и прогноза реализации ТП. Для этого значения, полученные в ходе мониторинга, ранжируются с учетом результата и вероятности, определяющей этот результат, путем ее принадлежности к определенному интервалу.

На рисунке 5 представлена схема выбора регулирующего решения для реализации ТП строительства ОЖДП с применением ИНС, положенная в основу модуля ИАС «Решение». Модуль включает в себя базу данных (БД) (упорядоченную совокупность сведений о процедуре и результатах выбора регулирующего решения для реализации ТП) и ИНС. ИНС состоит из двух блоков: выборки данных (ВД) — хранилища примеров (набора пар входных данных и выходных параметров), необходимых для обучения ИНС, и нейросимулятора, реализующего процедуру обучения.



**Рисунок 5.** Схема разработки регулирующего решения для реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети (разработано автором)

**Figure 5.** Development scheme of a regulatory solution for the technological process implementation for the railway track facility construction using an artificial neural network (developed by the author)

Устанавливаются входные данные и выходные параметры модели, а также структура компонент векторов: входного  $X$  и выходного  $Y$ .

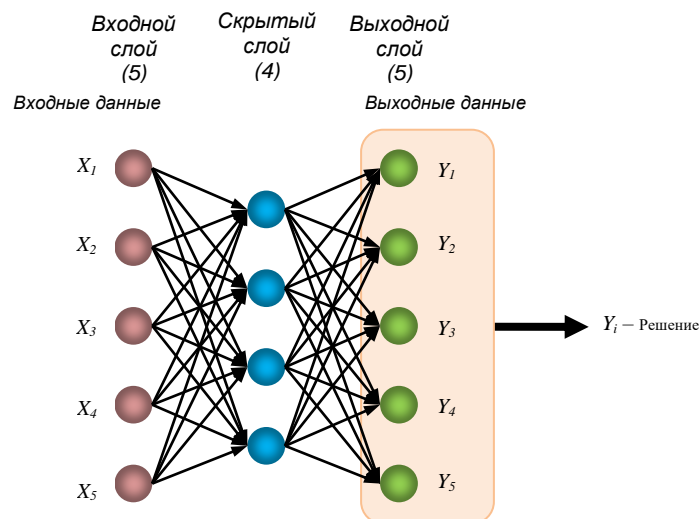
Содержимое компоненты входного вектора  $X$  определяют данные, оказывающие существенное влияние на результат. Соответственно содержимое компоненты выходного вектора  $Y$  должно быть адекватно входным данным.

Содержимое компонент векторов представляет собой числа, кодирующих наличие или отсутствие признаков для выбора регулирующего решения. При этом используется десятибалльная система кодирования.

Определение активационной функции скрытых нейронов и топология моделей ИНС формируется по правилам, описанным в работе [27]. В таком случае по рассматриваемым состояниям ТП сформированы следующие модели ИНС:

- модель выбора регулирующего решения для реализации ТП в целом;
- модель выбора регулирующего решения для использования ресурса при производстве работ в рамках ТП.

На рисунке 6 представлены ИНС, которые применялись для тестирования структуры и метода выбора регулирующего решения. ИНС относятся к типу *feedforward* и представляют собой организованную слоями совокупность нейронов (простых процессорных элементов). По связям, установленным между слоями, информация от нейронов из предыдущего слоя передается в следующий, претерпевая изменения в процессе обучения ИНС.



**Рисунок 6.** Нейросетевая структура выбора регулирующего решения для реализации технологического процесса (разработано автором)

**Figure 6.** The neural network structure for choosing a regulatory solution for the technological process implementation (developed by the author)



Пять нейронов во входном слое обозначают входные данные ( $X$ ) (табл. 1). Количество выходов (категорий) определяется количеством вариантов регулирующих решений ( $Y_i$ ): для ТП в целом — 5 (для ресурсного обеспечения ТП — 10).

Для выбора регулирующего решения применяется структура ИНС, построенная по принципу «победитель получает все» ( $Y_i$ ), что обусловлено необходимостью разделить выходы на несколько классов. Это значит, что регулирующее решение будет определяться выходной ячейкой с наибольшим результатом (суммой весов), и которая в этом случае считается «победителем» группы.

Формирование структуры и обучение ИНС ( $MLP$ -сети) предполагает порядок действий, описанный в работе [27]. Для обучения сети использовалась группа обучающих примеров, состоящих из входных данных (результатов мониторинга реализации ТП) и вариантов регулирующих решений. Для тестирования ИНС были использованы данные, не входящие в обучающую выборку. Тестирование ИНС показало адекватную выбор варианта регулирующего решения с учетом результатов мониторинга реализации ТП и особенностей производственной обстановки. Примеры таких решений представлены в таблице 2. На основе новых результатов мониторинга реализации ТП процедура повторялась.

Таблица 2 / Table 2

**Примеры регулирующих решений**  
**Examples of regulatory decisions**

| Регулирующее решение<br>Regulatory decision   | Описание<br>Description  |
|---|--|
| Замена машины («ЗТС»)<br>Vehicle Replacement  | Из резерва СПО необходимо задействовать новый бульдозер, но его технические характеристики будут отличаться от характеристик бульдозера, выводимого в ремонт<br>It is necessary to use a new bulldozer from the contractor reserve, but its technical characteristics will differ from the characteristics of the bulldozer being taken out for repair |
| Уточнение калькуляции затрат труда («УКЗТ»)<br>Refinement of labor costing          | Необходимо скорректировать перечень работ (ПТП) и затраты труда в связи с использованием новой машины<br>It is necessary to adjust the list of works (simple technological process) and labor costs in connection with the use of a new vehicle  |
| Замена геосинтетического материала («ЗГСМ»)<br>Replacement of geosynthetic material | Необходима замена геотекстиля на месте повреждения<br>Replacement of geotextiles at the site of damage is necessary  |
| Дополнительное уплотнение грунта («дуг»)<br>Additional soil compaction              | Необходимо увеличить количество проходок по слою грунта прицепным катком с пневмоколесными шинами<br>It is necessary to increase the number of penetrations along the soil layer by a trailed roller with pneumatic tires  |

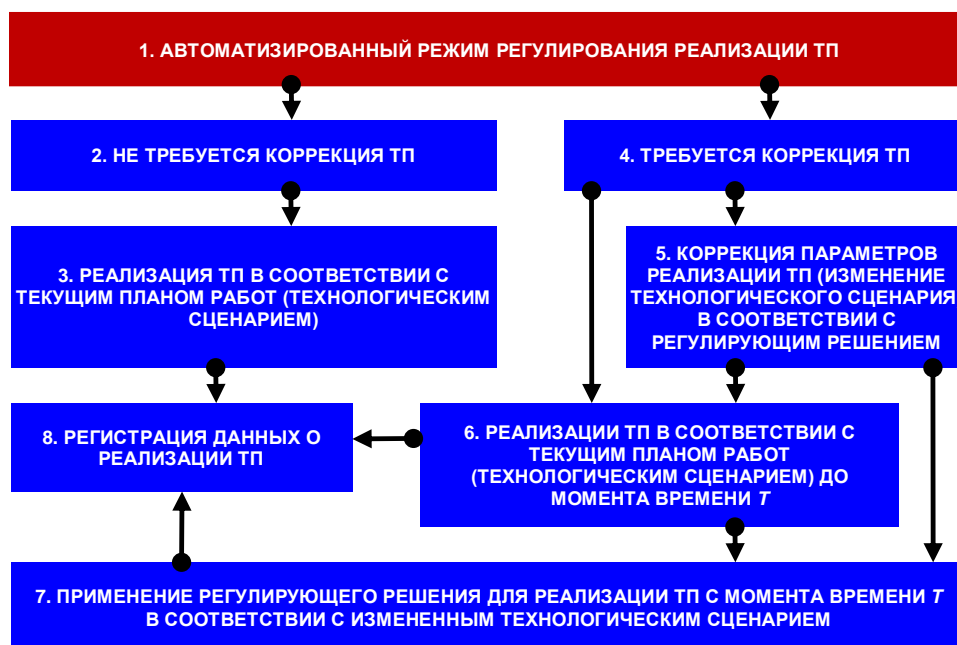
Составлено автором / Compiled by the author

Адекватная генерация действий ИНС в виде регулирующих решений позволяет перейти к следующему этапу — *применения регулирующего решения для реализации ТП* строительства ОЖДП.

В зависимости от выбранного регулирующего решения определяется необходимость коррекции ТП. Сведения об этом передаются в АЦТР. А в автоматизированном режиме формируется ТСц, который содержит информацию о конфигурации ТП и его ресурсном обеспечении, требуемые параметры к реализации и условия функционирования ТП. В соответствии с ТСц выполняется регулирование ТП и ресурсов. Регулирование осуществляется разработчиком ОТД и исполнителями СПО.

Разработчиком ОТД осуществляется корректировка ТП с применением ИАС. Исполнителями СПО осуществляются: подготовка фронта работ с учетом корректировки, настройка и применение технических средств на скорректированный режим работ, применение инструкций, получаемых из ИАС, визуальный контроль производства работ.

На рисунке 7 показана схема регулирования реализации ТП строительства ОЖДП. Регулирование осуществляется в автоматизированном режиме, опираясь на ТСц и сведения, размещенные в АЦТР.



*Рисунок 7. Схема регулирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)*

*Figure 7. Scheme of regulation of the technological process implementation of railway track facility construction (developed by the author)*

В том случае, если в коррекции ТП нет необходимости работы продолжают в соответствии с АЦТР и утвержденным ТСц. Если же коррекция ТП требуется, то выполняется корректировка параметров реализации ТП в соответствии с регулирующим решением.

Корректировка ТП осуществляется в одном из следующих направлений:

- корректировка структуры ТП путем изменения последовательности выполнения ПТП так, чтобы обеспечить выполнение объемов работ и заданную продолжительность строительства;
- изменение параметров соответствия ТП проектным требованиям за счет корректировки его ресурсного обеспечения (трудовых, технических и материальных) с учетом условий производства работ;
- одновременная корректировка структуры ТП и его ресурсной обеспеченности.

Перед началом реализации скорректированного ТП строительства ОЖДП синхронизируются калькуляция затрат труда, себестоимость строительных работ и продолжительность строительства. Для этого применяется программный инструментарий, входящий в состав ИАС и описанный в работах [1; 10; 16; 27]. После этого ТП считается готовым к реализации в скорректированной конфигурации. Во время реализации ТП снова осуществляется мониторинг на предмет удовлетворения проектным требованиям. В случае неудовлетворения требованиям текущая конфигурация ТП снова корректируется.

#### **4. Практические аспекты применения мониторинга и регулирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути**

##### **4. Practical aspects of the monitoring and regulation application of the technological process implementation of railway track facility construction**

Для практического применения мониторинга и регулирования реализации ТП строительства ОЖДП используются экспериментальные программные модули, описанные в пп. 1–3 настоящей работы. Интеллектуализация обеспечивается путем применения модулей, построенных на расчетно-логических моделях оценки реализации ТП и выбора регулирующего решения.

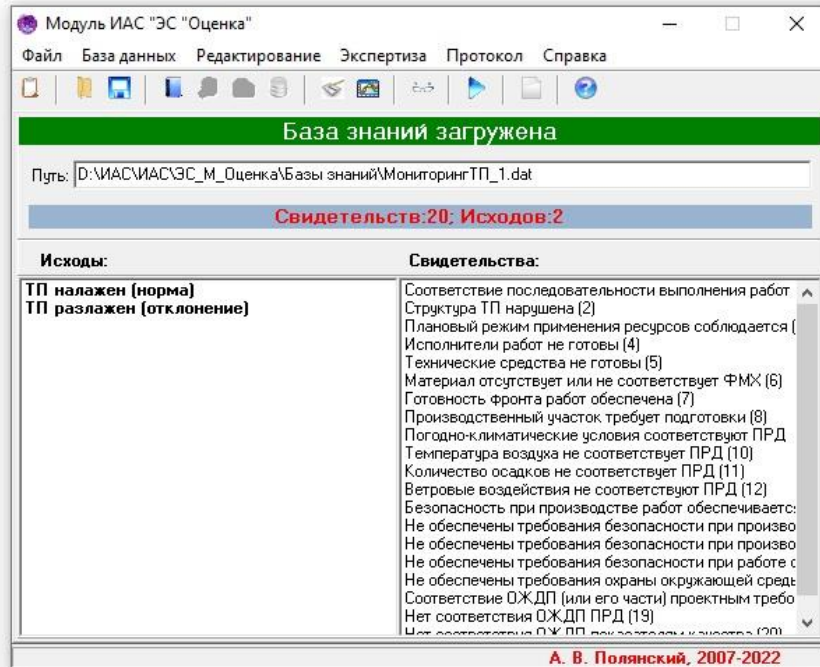
Модуль ИАС «ЭС «Оценка» реализует интеллектуальный режим оценки хода производства работ (реализацию ТП). Включает в себя БД «Оценка» (упорядоченную совокупность сведений о процедуре и результатах оценки реализации ТП) и ЭС. Сама ЭС состоит из двух блоков: БЗ «Оценка» — хранилища правил-продукций, необходимых для проведения оценки реализации ТП, и интеллектуального решателя, реализующего байесовскую систему логического вывода.

Модуль ИАС «Решение» реализует интеллектуальный режим выбора регулирующего решения для корректировки ТП. Включает в себя БД (упорядоченную совокупность сведений о процедуре и результатах выбора регулирующих решений) и нейросимулятора. Работа нейросимулятора осуществляется совместно с ВД «Решение» — хранилища обучающих и тестовых примеров для ИНС.

Для примера практического воплощения мониторинга и регулирования реализации ТП рассмотрено возведение участка подтопляемой 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; 10] и других работах автора были рассмотрены этапы разработки ТП в рамках инженерно-интеллектуального обеспечения возведения участка указанной насыпи. В статье [27] описаны этапы как разработки, так и реализации ТП. В частности, показаны фрагменты работы модуля ИАС «Техрегламент» в режиме «Реализация технологического процесса». Там источником данных были показатели реализации ТП, определяемые в ходе мониторинга и регулирования реализации ТП для смены № 3.

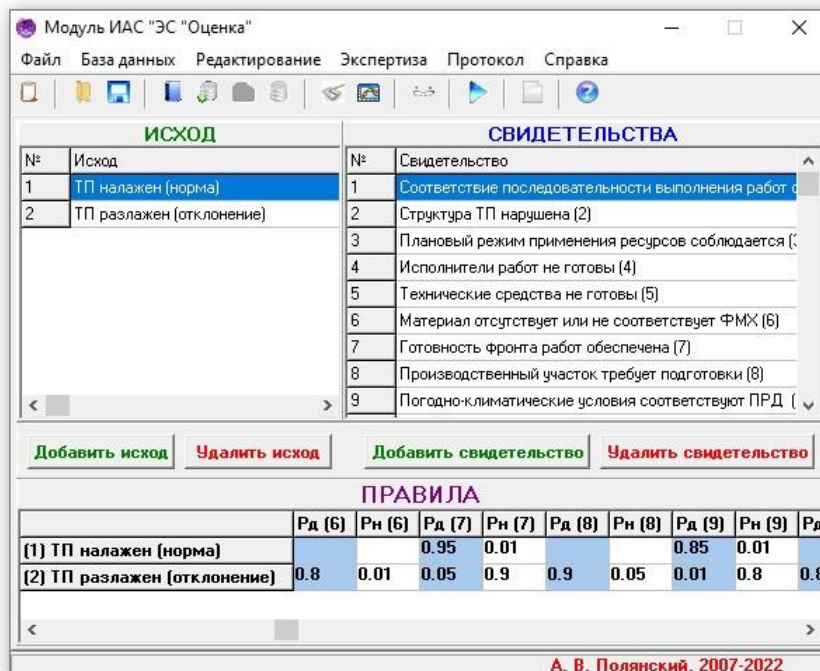
С применением модуля ИАС «Наблюдение» в автоматизированном режиме была проведена регистрация показателей реализации ТП возведения ЖДЗП. На основе полученных данных с привлечением экспертной системы вероятностного типа (модуль ИАС «ЭС «Оценка») проведена оценка реализации ТП (рис. 8–11). ТП для смены № 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». В представленном примере прогноз реализации ТП определяется состоянием «Развивающийся», то есть вероятна реализация ТП на горизонте трех последующих смен как в сторону соответствия плановым показателям, так и сторону отклонения от них.



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

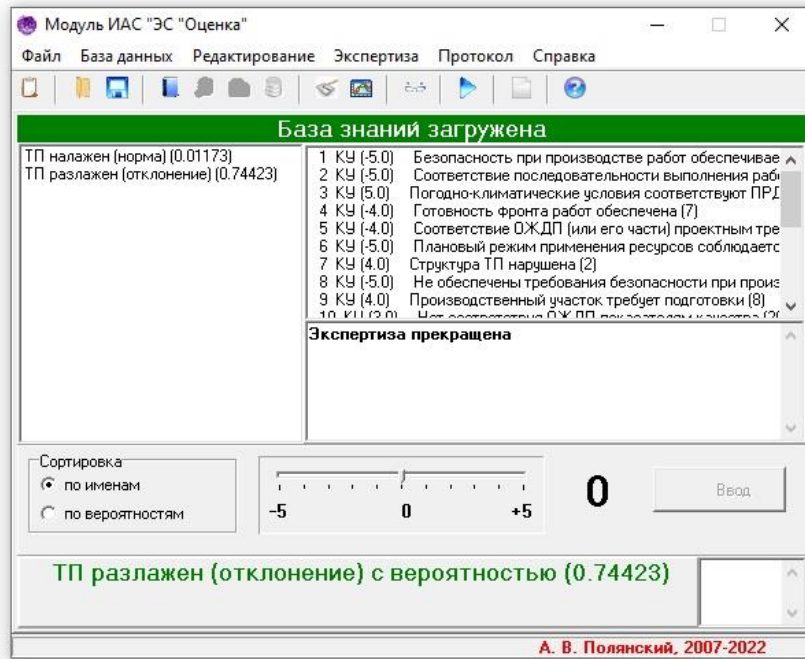
**Figure 8.** Fragment of the program module intelligent automated systems "expert system" Evaluation "Knowledge Base" mode (developed by the author)



**Рисунок 9.** Фрагмент работы программного модуля ИАС «ЭС «Оценка», режим «Создание/Редактирование базы знаний» (разработано автором)

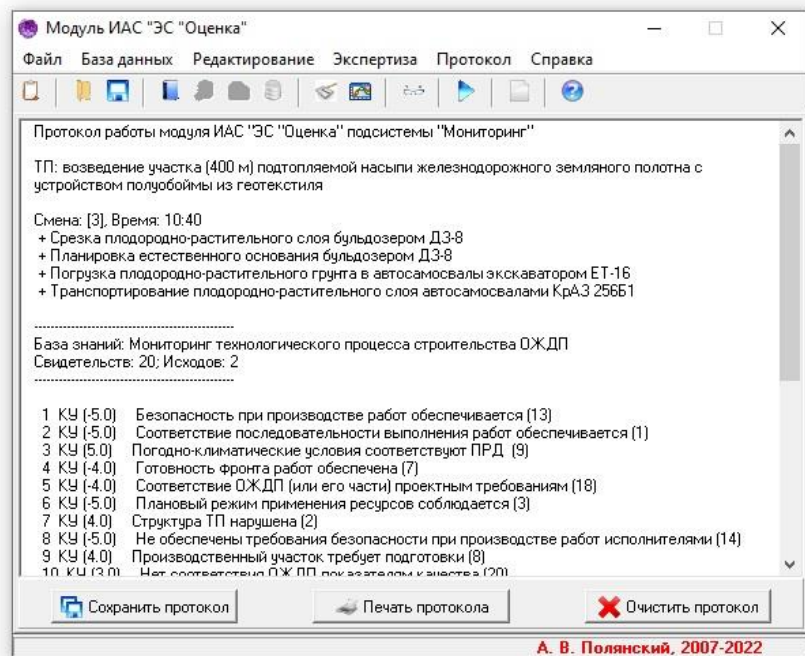
**Figure 9.** A fragment of the program module of the intelligent automated systems "expert system" Evaluation, the "Create/Edit Knowledge Base" mode (developed by the author)





*Рисунок 10. Фрагмент работы программного модуля ИАС «ЭС «Оценка», режим «Экспертиза» (разработано автором)*

*Figure 10. A fragment of the operation of the software module intelligent automated systems "expert system "Assessment", mode "Expertise"(developed by the author)*



*Рисунок 11. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Оценка», режим «Протокол работы ЭС» (разработано автором)*

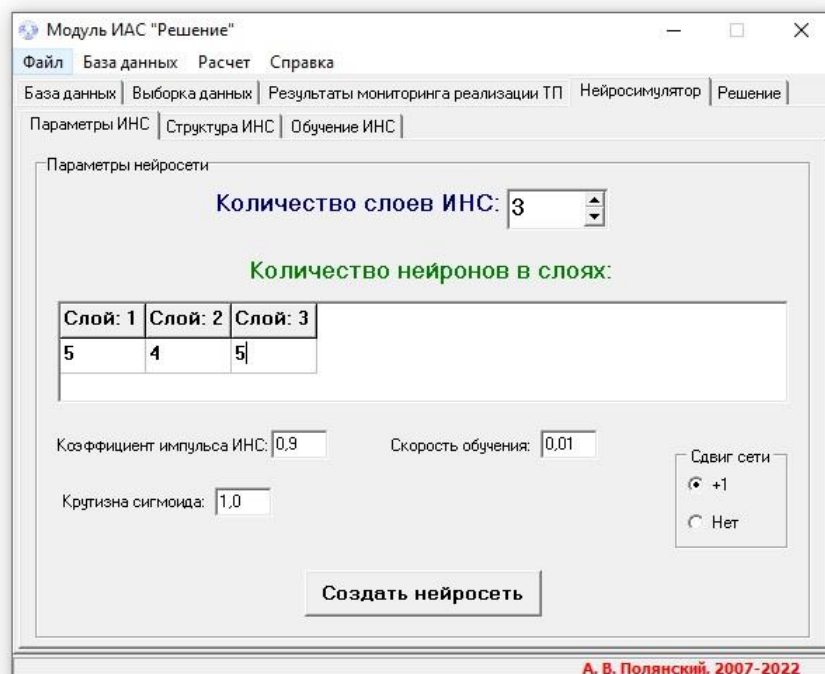
*Figure 11. A fragment of the operation of the intelligent automated systems software module "Assessment", the "expert system operation protocol" mode (developed by the author)*

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.

В целом мониторинг реализации ТП предполагает периодический сбор сведений по каждой работе (ПТП), входящей в ТП и осуществляемой в определённую смену. В данном случае рассматривается работа (ПТП) «П.2. (ГЭСН 01-01-031-05) Разравнивание грунта бульдозером».

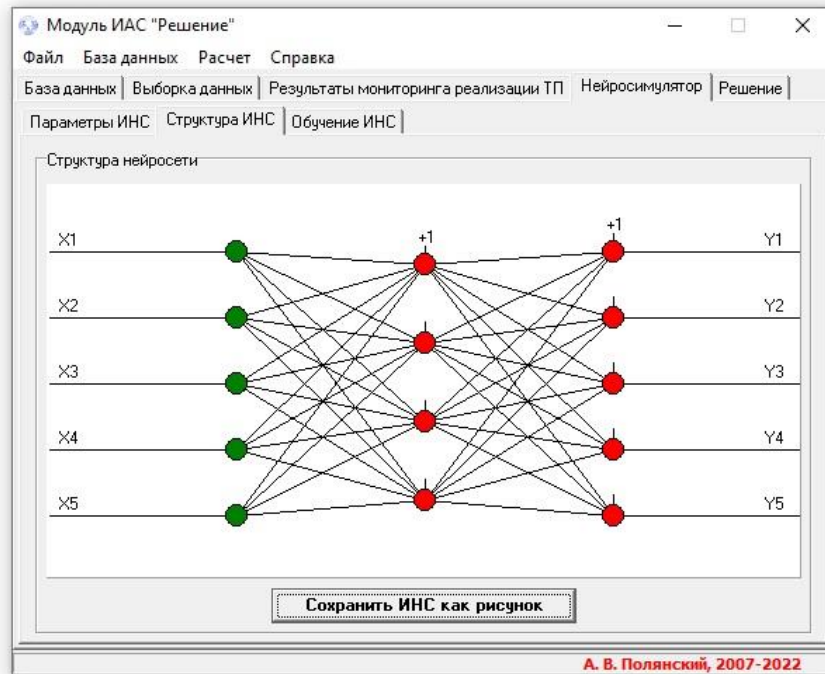
По результатам мониторинга были предложены решения, направленные на обеспечение плановых показателей ТП. Для этого был использован модуль ИАС «Решение» подсистемы «Регулирование». На рисунках 12–14 показаны этапы формирования, настройки и обучения ИНС. На рисунке 15 представлен фрагмент работы программного модуля в режиме определения регулирующего решения. В блоке «Регулирующее решение» решения представлены в сокращенном виде.

Для рассматриваемой смены в 10 часов 40 минут было зафиксировано снижение выполняемого объема работ вследствие снижения производительности машины. Сильное повышение температуры воздуха привело к технической неисправности в бульдозере, ликвидация которой потребовала длительного ремонта.



**Рисунок 12.** Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Параметры ИНС» (разработано автором)

**Figure 12.** A fragment of the work of the software module intelligent automated systems "Solution", mode "Neurosimulator — artificial neural network parameters" (developed by the author)



*Рисунок 13. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Структура ИНС» (разработано автором)*

*Figure 13. A fragment of the work of the program module intelligent automated systems "Solution", the mode "Neurosimulator — artificial neural network Structure" (developed by the author)*

|    |    |
|----|----|
| X1 | 30 |
| X2 | 60 |
| X3 | 10 |
| X4 | 20 |
| X5 | 40 |

|    |           |
|----|-----------|
| Y1 | 0         |
| Y2 | 19.956773 |
| Y3 | 0         |
| Y4 | 0         |
| Y5 | 0         |

Допустимая ошибка ИНС: 0,05

Обучить ИНС

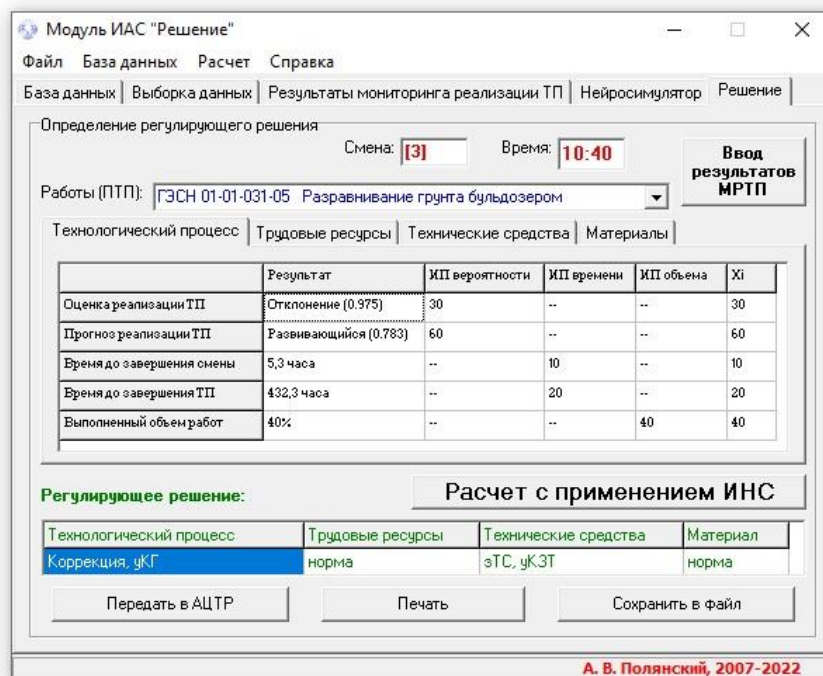
СЕТЬ ОБУЧЕНА

Контроль обучения ИНС

А. В. Полянский, 2007-2022

*Рисунок 14. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Обучение ИНС» (разработано автором)*

*Figure 14. A fragment of the work of the program module intelligent automated systems "Solution", the mode "Neurosimulator — Artificial neural network training" (developed by the author)*



*Рисунок 15. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Решение» (разработано автором)*

*Figure 15. A fragment of the work of the software module intelligent automated systems "Solution", mode "Solution" (developed by the author)*

Данное обстоятельство вызвало необходимость в регулировании ТП и заключалось оно в исполнении следующих решений:

- «зТС» — замена машины — из резерва СПО необходимо задействовать новый бульдозер, но его технические характеристики будут отличаться от характеристик бульдозера, выводимого в ремонт;
- «уКЗТ» — уточнение калькуляции затрат труда — необходимо скорректировать перечень работ (ПТП) и затраты труда в связи с использованием новой машины;
- «уКГ» — уточнение календарного графика — необходимо скорректировать календарный график и график распределения ресурсов после корректировки перечня работ и затрат труда.

Представленные фрагменты работы подсистем ИАС «Мониторинг» и «Регулирование» показывают некоторые возможности мониторинга и регулирования реализации ТП строительства ОЖДП. Сочетание автоматизированных и интеллектуальных режимов позволяет оперативно вносить изменения в ТСц. А ТСц по сути является программой достижения технологических целей производства строительных работ. В случае изменения производственных условий такой подход обеспечивает реализацию скорректированного ТП в соответствии с проектными

требованиями и регламентирует режимы работы технических средств и действия исполнителей СПО.

## Заключение

### Conclusion

В статье рассмотрены теоретические результаты исследования и возможности практического применения мониторинга и регулирования процессов производства работ в ЖДС с применением интеллектуальных технологий.

В рамках формирования методологии ИИОТП ЖДС была разработана системы мониторинга и регулирования реализации ТП строительства ОЖДП.

С целью улучшения технологического обоснования и управления ЖДС, а также повышения эффективности строительства ОЖДП предлагается решать задачи мониторинга и регулирования реализации ТП в автоматизированном и интеллектуальном режимах. Для этого были описаны:

- процедура регистрации показателей реализации ТП во времени;
- модель ЭС для оценки реализации ТП строительства ОЖДП на основе вероятностной МПЗ;
- процедура прогнозирования реализации ТП, построенная на теории марковских СлП;
- модель ИНС выбора регулирующего решения для реализации ТП;
- процедура применения регулирующего решения для корректировки ТП строительства ОЖДП.

На основе указанных процедур и моделей были разработаны соответствующие модули подсистем ИАС: «Мониторинг» и «Регулирование». Практическое применение модулей данных подсистем для строительства участка подтопляемой насыпи ЖДЗП позволило обеспечить реализацию ТП в соответствии с проектными требованиями, надежность принимаемых решений в меняющихся условиях производства работ, а также высвободить время исполнителей СПО, затрачиваемое на поиск и устранение несоответствий ТП.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Polyanskiy, A.** Stages of Intellectualization of Engineering and Technical Support of Railway Construction / A. Polyanskiy. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.093> // Transportation Research Procedia. — 2022. — Т 61. — С. 574–581. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522001016> (дата обращения: 19.03.2022).
2. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / под редакцией А.А. Большакова. — 2-е изд. — М.: «Горячая линия-Телеком», 2016. — 160 с.
3. **Мастаченко В.Н.** Искусственный интеллект в контексте транспортной науки / В.Н. Мастаченко // Мир транспорта. — 2004. — № 3. — С. 12–17.
4. Автоматизированное проектирование организации строительства железных дорог / под редакцией С.П. Першина. — М.: Транспорт, 1991. — 261 с.
5. **Васильев, В.М.** Автоматизация организационно-технологического планирования в строительном производстве / В.М. Васильев, Л.Б. Зеленцов. — М.: Стройиздат, 1991. — 152 с.
6. **Соколов, Ф.Г.** Контроль качества железнодорожного строительства: Справочник / Ф.Г. Соколов, А.Е. Вичеревин — М.: Транспорт, 1982. — 399 с.
7. **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> (дата обращения: 19.03.2022).
8. **Leo Kumar, S.P.** State of the art-intense review on artificial intelligence systems application in process planning and manufacturing / S.P. Leo Kumar. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.08.005> // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2017. — Т 65. — С. 294–329. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197617301896> (дата обращения: 18.05.2022).
9. **Pan, Y.** Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends / Y. Pan, L. Zhang. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517> // Automation in Construction. — 2021. — Т 122. — С. 103517. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520310979> (дата обращения: 24.05.2022).
10. **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. — С. 03SATS122. — URL: <https://t-s.today/03SATS122.html> (дата обращения: 14.04.2022).
11. **Naticchia, B.A.** 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. — Т 29. — С. 148–160. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580512001689> (дата обращения: 27.05.2022).
12. **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. — Т 38. — С. 27–40. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034617305086> (дата обращения: 27.06.2022).
13. **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. — Т 161. — С. 97–103. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816327126> (дата обращения: 27.06.2022).
14. **Завадскас, Э.-К.** Системотехническая оценка технологических решений строительного производства / Э.-К. Завадскас. — Л.: Стройиздат, 1991. — 256 с.
15. **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. — Т 15. — № 3–4. — С. 383–390. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417498000530> (дата обращения: 27.06.2022).

16. **Полянский, А.В.** Основные принципы технологического обоснования конструктивных решений транспортных объектов с применением экспертной системы / А.В. Полянский // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Междунар. науч.-практ. конф., Т. 1. — Иркутск: ИрГУПС, 2019. — С. 499–504. — URL: <https://www.irgups.ru/sites/default/files/oo/science/conferences/TISR/2019/ТИСП-1-2019.pdf> (дата обращения: 14.04.2022).
17. **Нейлор, К.** Как построить свою экспертную систему / К. Нейлор. — Перевод с англ. Н.Н. Слепова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 288 с.
18. **Нейман, А.О.** Системное управление ресурсопотоками строительных процессов: Монография / А.О. Нейман. — М.: Маршрут, 2006. — 240 с.
19. **Нейман, А.О.** Регулирование процесса возведения железнодорожных насыпей / А. О. Нейман, А.В. Полянский, С.Г. Жорняк, И.Д. Ткачевский, А.В. Козлов // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. — 2005. — № 4. — С. 4–8.
20. **Яблонский, А.А.** Моделирование систем управления строительными процессами: Монография / А.А. Яблонский. — М.: АСВ, 1994. — 300 с.
21. **Каклаускас, А.** Биометрическая и интеллектуальная поддержка решений: монография / А. Каклаускас, Э.К. Завадскас. — Вильнюс: Техника, 2012. — 344 с.
22. **Джонс, М.Т.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях / М.Т. Джонс. — Пер. с англ. Осипов А.И. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 312 с.
23. **Tariq R.** Make your own network / R. Tariq. — Скоттс Вэлли: Createspace Independent Publishing Platform, 2016. — 224 с.
24. **Waziri, B.S.** Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management / B.S. Waziri, K. Bala, S. Bustani. — DOI <https://doi.org/10.7492/IJAEC.2017.006> // International Journal of Architecture, Engineering and Construction. — 2017. — Т 6. — № 1. — С. 50–60. — URL: <http://journals.iasdm.org/index.php/ijaec/article/view/401> (дата обращения: 07.05.2022).
25. **Gajzler M.** The Possibility of Using Neural Networks in Data Analysis Connected with Observation in the Construction Process Simulation / M. Gajzler, A. Konczak. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.029> // Procedia Engineering. — 2015. — Т 122. — С. 228–234. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815031185> (дата обращения: 11.05.2022).
26. **Rojek I.** Technological process planning by the use of neural networks / I. Rojek. — DOI <https://doi.org/10.1017/S0890060416000147> // Artificial intelligence for engineering design, analysis and manufacturing. — 2017. — Т 31. — № 1. — С. 1–15. — URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/ai-edam/article/technological-process-planning-by-the-use-of-neural-networks/A3FD3A5A3E1001486C57D9DC8B9E864C> (дата обращения: 05.06.2022).
27. **Полянский, А.В.** Планирование ресурсов технологического процесса строительства объектов железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети / А.В. Полянский. — DOI <https://doi.org/10.15862/01SATS321> // Транспортные сооружения. — 2021. — Т 8. — № 3. — С. 01SATS321. — URL: <https://t-s.today/01SATS321.html> (дата обращения: 14.05.2022).

---

#### 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](mailto:polal_82@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=412433](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57459964000>

---

Статья получена: 05.09.2022. Принята к публикации: 26.10.2022. Опубликовано онлайн: 10.11.2022.

## REFERENCES

1. Polyanskiy A. Stages of Intellectualization of Engineering and Technical Support of Railway Construction. *Transportation Research Procedia*. 2022; 61: 574–581. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.093>.
2. Bol'shakov A.A. ed. *Intellektual'nyye sistemy upravleniya organizatsionno-tehnicheskimi sistemami* [Intelligent management systems for organizational and technical systems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2006. (In Russ.).
3. Mastachenko V.N. *Iskustvennyy intellekt v kontekste transportnoy nauki* [Artificial intelligence in the context of transport science]. *World of Transport and Transportation*. 2004; 2(3): 12–17. (In Russ.).
4. Pershin S.P., Ivanov M.I., Akuratov A.F. et al. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye organizatsii stroitel'stva zheleznykh dorog* [Computer-aided design of the organization of construction of railways]. Moscow: Transport Publ.; 1991. (In Russ.).
5. Vasil'yev V.M., Zelentsov L.B. *Avtomatizatsiya organizatsionno-tehnologicheskogo planirovaniya v stroitel'nom proizvodstve* [Automation of organizational and technological planning in the construction industry]. Moscow: Stroyizdat; 1991. (In Russ.).
6. Sokolov F.G., Vicherevin A.E. *Kontrol' kachestva zheleznodorozhnogo stroitel'stva: Spravochnik* [Railway Construction Quality Control: A Handbook]. Moscow: Transport Publ.; 1982. (In Russ.).
7. 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 19th March 2022). (In Russ.).
8. Leo Kumar S.P. State of The Art-Intense Review on Artificial Intelligence Systems Application in Process Planning and Manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2017; 65: 294–329. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.08.005>.
9. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*. 2021; 122: 103517. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>.
10. 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 Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS122>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. Zavadskas, E.-K. *Sistemotekhnicheskaya otsenka tehnologicheskikh resheniy stroitel'nogo proizvodstva* [System-technical evaluation of technological solutions of construction industry]. Leningrad: Stroyizdat; 1991. (In Russ.).
15. 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).
16. Polyanskiy A.V. [Basic principles of technological justification of constructive solutions for transport facilities using an expert system]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona = Transport infrastructure of the Siberian region*. 2019; 1: 499–504. Available at: <https://www.irgups.ru/sites/default/files/oo/science/conferences/TISR/2019/ТИСР-1-2019.pdf> (accessed 14th April 2022). (In Russ.).
17. Naylor C. *Build your own expert system*. Wilmslow: Sigma Technical Press; 1983. (In Eng.).

18. Neyman A.O. Sistemnoye upravleniye resursopotokami stroitel'nykh protsessov: Monografiya [System management of resource flows of construction processes: Monograph]. Moscow: Marshrut publ.; 2006. (In Russ.).
19. Neyman A.O. Regulirovaniye protsessa vozvedeniya zheleznodorozhnykh nasypey [Regulation of the process of erection of railway embankments]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management: scientific information collection]. 2005; (4): 4–8. (In Russ.).
20. Yablonskiy A.A. Modelirovaniye sistem upravleniya stroitel'nymi protsessami: Monografiya [Modeling of building process control systems: Monograph]. Moscow: ASV; 1994. (In Russ.).
21. Kaklauskas A., Zavadskas E. [Biometric and Intelligent Decision Support: Monograph]. Vilnius: Technika; 2012. (In Russ.).
22. Jones M.T. AI Application Programming. Hingham, Massachusetts: Charles River Media; 2003. (In Eng.).
23. Tariq R. Make your own network. Scotts Valley: Createspace Independent Publishing Platform; 2016. (In Eng.).
24. Waziri B.S., Bala K., Bustani S. Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*. 2017; 6(1): 50–60. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7492/IJAEC.2017.006>.
25. Gajzler M., Konczak A. The Possibility of Using Neural Networks in Data Analysis Connected with Observation in the Construction Process Simulation. *Procedia Engineering*. 2015; 122: 228–234. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.029>.
26. Rojek I. Technological process planning by the use of neural networks. *Artificial intelligence for engineering design, analysis and manufacturing*. 2017; 31(1): 1–15. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890060416000147>.
27. Polyanskiy A.V. Resource planning of the railway facilities construction technological process with the use of an artificial neural network. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2021; 8(3): 01SATS321. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/01SATS321>.

---

**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](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57459964000>

---

Submitted: 5th September 2022. Revised: 26th October 2022. Published online: 10th November 2022.