

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

2023, Том 10, № 2 / 2023, Vol. 10, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS223.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS223 (<https://doi.org/10.15862/03SATS223>)

Регулирование процессов производства работ в железнодорожном строительстве с применением нейросетевых 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 регулирования реализации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети. 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, 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 регулирования реализации технологических процессов строительства объектов железнодорожного пути. Регулирование процесса опирается на результаты мониторинга производства работ. Настройка технологического процесса под меняющиеся условия производства работ обеспечивает гибкость строительству объектов железнодорожного пути. Это достигается путем выбора регулирующих решений с применением возможностей искусственной нейронной сети и последующей корректировкой хода работ. На основе результатов теоретического исследования в статье представлены практические аспекты реализации регулирования процессов производства работ в железнодорожном строительстве с применением нейросетевых технологий на примере возведения подтопленной 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; регулирование; принятие решений; искусственная нейронная сеть

Regulation of work execution processes in railway construction using neural network 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 theoretical provisions and practical possibilities of regulating the technological process implementation of construction railway track entity using an artificial neural network. Railway construction as a complex dynamic system requires certain resources for its maintenance. Under these conditions, effective control over the technology of work execution performed during the railway track entity construction is of decisive importance. This can be achieved by improving the existing system of engineering and technical support for railway construction through the introduction of a subsystem for engineering and intellectual support of technological processes for the railway entities construction. One of the subsystem's tasks is the effective use of automation tools with artificial intelligence elements.

The appearance of deviations from planned requirements during construction work, due to the stochastic nature of railway construction, leads to technology violations, an increase in labor costs, prime cost, an increase in duration and, as a result, a deterioration in the railway entity operational characteristics. To avoid such a development of events, a prompt review of the adopted technological

solutions is necessary. To this end, as part of the methodology formation for technological processes engineering and intellectual support of railway construction, a system has been developed for regulating the technological processes implementation for the railway entity construction. The process regulation is based on the work execution monitoring results. Adjusting the technological process to changing work execution conditions flexibility in the railway track entity construction. This is achieved by choosing regulatory solutions using the artificial neural network capabilities and then adjusting the work progress. Based on the theoretical study results, the article presents the practical aspects of the work execution processes regulation implementation in railway construction using neural network technologies on the example of a flooded railway roadbed subgrade construction.

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 entity; artificial intelligence methods; regulation; making decisions; 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

В статье рассматриваются результаты исследования, проводимого в области разработки подсистемы инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов (ИИОТП) системы инженерно-технического сопровождения (ИТС) железнодорожного строительства (ЖДС), в частности, регулирования реализации технологических процессов (ТП) строительства объектов железнодорожного пути (ОЖДП) [1]. В статьях [2; 3] 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 исследования были разработаны расчетные и расчетно-логические модели для осуществления процедуры регулирования ТП. 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 регулирования технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети

1. Theoretical grounds for creating a technological process regulation system for the railway track entity construction using an artificial neural network

ЖДС можно рассматривать как совокупность ТП. Каждый ТП, в свою очередь, представляет собой совокупность простых технологических процессов (ПТП), которые определяются двумя текущими состояниями: исходным (S_H) и результирующим (S_P) (рис. 1). Параметры исходного состояния ПТП считаются известными, а параметры результирующего — устанавливаются проектными (плановыми) требованиями ($S_{П}$). Очевидно, что целью реализации всех ПТП будет обеспечение равенства результирующего состояния проектным требованиям, то есть должно быть выполнено условие:

$$S_P = S_{П}. \quad (1)$$

Смена состояний ПТП (переход от исходного к результирующему) неизбежно сопровождается отклонениями, изменяющими стоимость и ценность будущего ОЖДП. Если отклонения будут соответствовать допустимым значениям, то ими можно пренебречь и считать, что условие

(1) достигнуто. Выход отклонений за пределы проектных требований ($S_p \neq S_{\Pi}$) влечет за собой, повторение или продолжение определенных работ в рамках ТП. Причем это будет сопровождаться дополнительными расходами ресурсов и должно происходить до тех пор, пока отклонения не окажутся в допустимых пределах с целью выполнения условия (1) [4; 5].

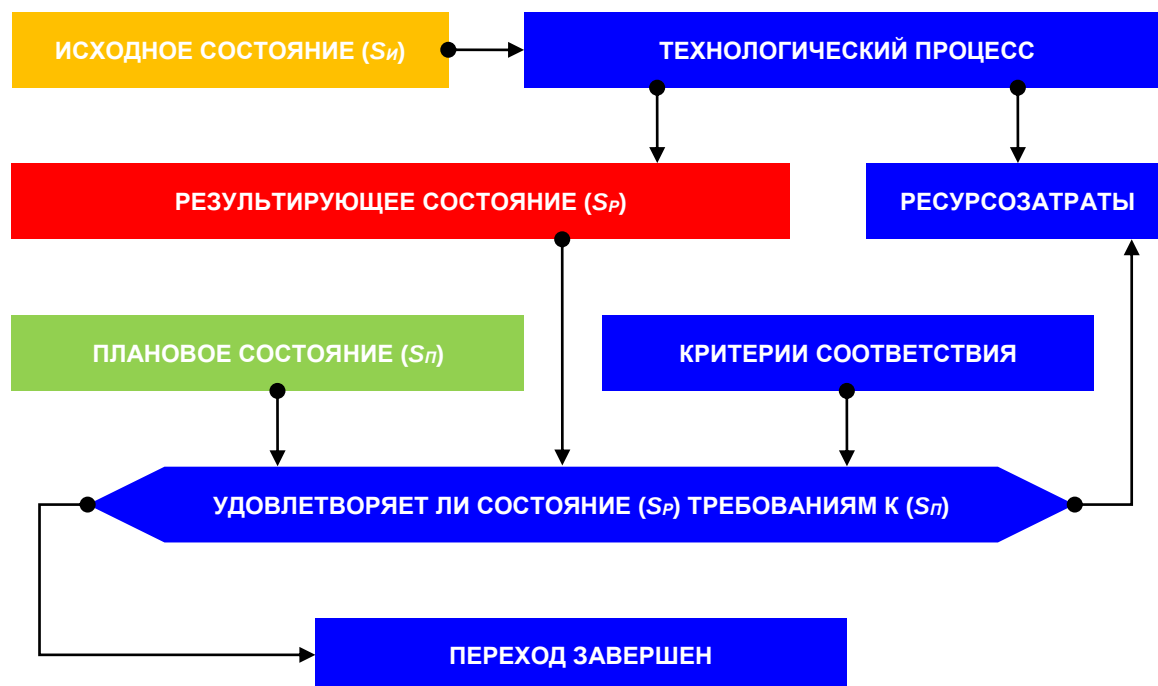


Рисунок 1. Информационная модель технологического процесса (разработано автором)

Figure 1. Technological process entity-relationship model (developed by the author)

Смена состояний ТП с учетом вышеперечисленных особенностей его реализации соответствует марковским закономерностям переходных процессов [1; 3; 4]. Сам переходной процесс представляет собой динамическую систему, функционирующую во времени и пространстве, которая под влиянием воздействий переходит из одного установившегося режима в другой, меняя свои состояние, структуру и параметры.

В то же время ТП является частью организационно-технологические системы строительного производства, которая сложнее любой технической системы, так как ее состояние менее предсказуемо. Именно это обстоятельство определяет необходимость регулирования реализации ТП. В основе регулирования системы или процесса лежит поток данных, а именно: их сбор, хранение, преобразование и выдача. Достоверность данных и точность их использования определяют качество регулирования [4; 6].

Цели регулирования реализации ТП строительства ОЖДП достигаются путем исполнения технологического сценария (ТСц), в котором сформирована необходимая структура производства работ,

настроены технические средства и трудовые ресурсы на требуемые режимы, а также иницируются и контролируются организационные мероприятия [6; 7]. Сам ТСц является результатом разработки ТП или его корректировки на основе результатов мониторинга производства работ [7].

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 и характеристиками ОЖДП.

Для эффективного регулирования ТП предлагается использовать данные, размещенные в адаптивном цифровом технологическом регламенте (АЦТР) [7]. Эти данные являются основой для установления зависимости между показателями ТП и характеристиками свойств ОЖДП. Однако широко используемая линейная регрессионная модель для описания этой зависимости в большинстве случаев неадекватна реальной динамике сложных (многоэтапных) процессов [8–14].

Изменчивость показателей реализации ТП, его ресурсного обеспечения и особенности ЖДС позволяют воспользоваться одним из наиболее эффективных средств для выбора регулирующих решений (РР) — искусственной нейронной сетью (ИНС) типа *MLP* (*multilayer perceptron* — многослойный персептрон) [9; 10; 14; 15].

Выбор ИНС для решения задачи обусловлен еще и тем, чтобы для ТП предусмотреть РР, которое могло бы охватить все возможные производственные ситуации просто невозможно. В связи с этим предлагается обучить ИНС на определенном количестве примеров (вариантах РР, привязанного к производственной обстановке). Обученная ИНС будет генерировать РР для иных производственных ситуаций, не входящих в набор обучающих [9–10; 15; 16].

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 [9; 10; 17–20].

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

Процедура выбора РР предполагает решение задач корректировки хода производства работ и использования ресурсов (трудовых, материальных, технических) с учетом всех ограничений (климатических, бюджетных, временных). Эти задачи могут быть представлены в виде модели, в которой каждое РР будет рассматриваться как $f: X \rightarrow y$, где f — сложная функция нескольких переменных, X — набор входных данных мониторинга реализации ТП, y — одно из РР.

При этом должно обеспечиваться близкое соотношение между моделируемым значением состояния ТП $\bar{y}(X_i)$ и значением состояния ТП после применения РР $y(X_i)$ с учетом данных мониторинга производства работ X_i [3].

Вид функции f определяется на основе выборки данных $DM = \{X | Y\} \in R^{p(n+m)}$, содержащей результаты мониторинга реализации ТП $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ и РР $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$.

Примем, что:

$x_1, \dots, x_n$ — данные мониторинга реализации ТП;

$y_1, \dots, y_m$ — регулирующие решения;

$t_{ij}, a_{ij}, w_{ikj}, i = 1, 2, 3, j = 1, \dots, r_i, k = 1, \dots, r_{i-1}$ — параметры ИНС;

r_1, r_2, r_3 — количество нейронов в слоях ИНС, соответственно в первом слое: $r_1 = n$; в скрытых слоях: r_2 — по расчету; в третьем слое: $r_3 = m$.

ИНС состоит из двух блоков: ВД — хранилища примеров (набора пар входных данных и выходных параметров), необходимых для обучения ИНС, и нейросимулятора, реализующего процедуру обучения.

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

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 РР). 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 (диапазону) [1].

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 Category	Технологический процесс Technological process	Ресурсы технологического процесса Technological process Resources
Входные данные Input data		
X_1	Результат оценки реализации ТП + Интервальная принадлежность вероятности результата оценки реализации ТП The result of the assessment of the implementation of the technological process + Interval membership of the assessment result probability of the technological process implementation	Результат оценки применения ресурса + Интервальная принадлежность вероятности результата оценки применения ресурса Assessment result of the resource use + Interval membership of the assessment result probability of the resource use
X_2	Результат прогноза реализации ТП + Интервальная принадлежность вероятности результата прогноза реализации ТП The 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 Forecast result of the resource use + Interval membership of the forecast result probability of the resource use
X_3	Интервальная принадлежность времени до завершения смены Time interval membership until the end of the shift	Интервальная принадлежность времени до завершения применения ресурса в смене Time interval membership until the end of the resource use on the shift
X_4	Интервальная принадлежность времени до завершения ТП Time interval membership until the the technological process completion	Интервальная принадлежность времени до завершения применения ресурса Time interval membership until the end of the resource application
X_5	Интервальная принадлежность выполненного объема работ Interval membership of the work scope completed	Интервальная принадлежность выполненного объема работ по ресурсу Interval membership of the work scope completed of resource
Выходные параметры Output parameters		
Y_i	Решение о продолжении или корректировке реализации ТП Decision to continue or adjust the technological process implementation	Решение о продолжении или корректировке применения ресурса Decision to continue or adjust the resource use

Составлено автором / Compiled by the author

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

кодирующие наличие или отсутствие признаков для выбора РР. При этом используется стобалльная система кодирования. В таблице 2 приведен пример кодирования результата оценки реализации ТП [3] путем разделения вероятностей состояний на интервалы с последующим присвоением интервалу значения в рамках стобалльной системы кодирования с шагом 10.

Таблица 2 / Table 2

Пример кодирования результата оценки реализации ТП
An example of coding the result of the
evaluation of the implementation of the technological process

10	20	30	40	50
0–0,100	0,101–0,200	0,201–0,300	0,301–0,400	0,401–0,500
60	70	80	90	100
0,501–0,600	0,601–0,700	0,701–0,800	0,801–0,900	0,901–1

Составлено автором / Compiled by the author

На рисунке 2 представлен пример кодирования входных данных и выходных параметров в качестве обучающих примеров с целью последующего выбора РР для реализации ТП строительства ОЖДП.

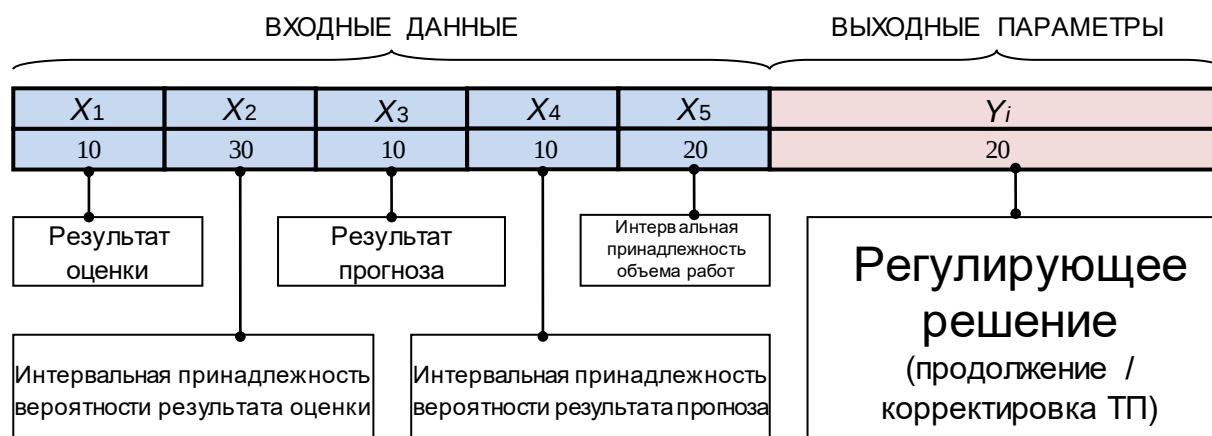


Рисунок 2. Пример кодирования входных данных и выходных параметров обучающих примеров для выбора регулирующего решения (разработано автором)

Figure 2. An example of encoding input data and output parameters of training examples for choosing a regulatory solution (developed by the author)

Определение активационной функции скрытых нейронов и топология моделей ИНС формируется по правилам, описанным в работе [14; 15]. В таком случае по рассматриваемым состояниям ТП сформированы следующие модели ИНС:

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

Разработка модели ИНС предполагает формирование ее топологии по следующим правилам [14; 15]:

- в соответствии с теоремой Арнольда — Колмогорова — Хехт-Нильсена функция активации скрытых нейронов задана сигмоидной (рис. 3):

$$f_{\sigma}(NET) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha NET}}, \quad (2)$$

где α — параметр, определяющий крутизну статической характеристики нейрона.

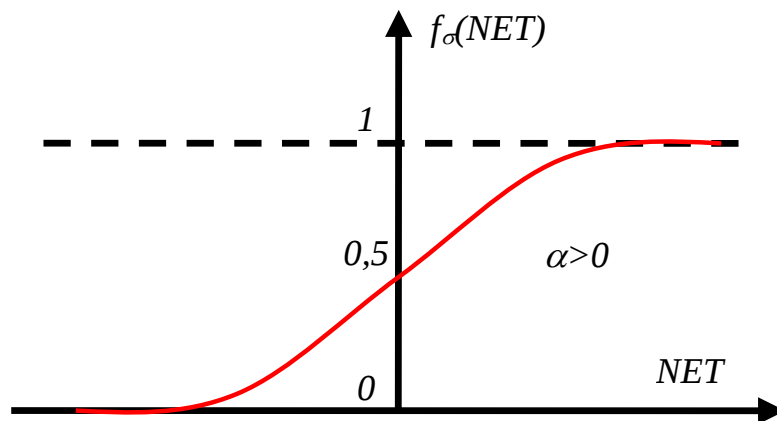


Рисунок 3. Сигмоидная функция активации (разработано автором)

Figure 3. Sigmoid activation function (developed by the author)

- количество входных нейронов N_X определяется числом категорий (табл. 1), полученных в ходе мониторинга реализации ТП, с последующей передачей сигнала всем нейронам скрытого слоя;
- количество выходных нейронов N_Y соответствует числу вариантов РР;
- количество нейронов в скрытом слое будет определяться как [14; 15]:

$$N = \frac{N_w}{N_X + N_Y}, \quad (3)$$

где N_w — необходимое количество синаптических связей (весовых коэффициентов ИНС), определяемое в соответствии с теоремой Арнольда — Колмогорова — Хехт-Нильсена по формуле [14; 15]:

$$\frac{N_Y DM}{1 + \log_2(DM)} \leq N_w \leq N_Y \left(\frac{DM}{N_X} + 1 \right) (N_X + N_Y + 1) + N_Y. \quad (4)$$

Выражение (4) содержит параметр DM , который соответствует объему обучающей выборки данных, а именно количество примеров, отображающих связь между данными мониторинга и вариантами РР.

Этот параметр оказывает существенное влияние на установление количества нейронов в скрытом слое и, как следствие, на качество процесса обучения ИНС. Диапазон изменения величины DM определяется следующим неравенством:

$$6(N_X + N + N_Y) \leq DM \leq 10(N_X + N + N_Y), \quad (5)$$

где N — количество нейронов в скрытом слое.

Минимальный объем обучающей выборки составит:

$$DM_{\min} = 6(N_X + N + N_Y), \quad (6)$$

а максимальный:

$$DM_{\max} = 10(N_X + N + N_Y). \quad (7)$$

В итоге диапазон нейронов в скрытом слое будет определяться значениями, находящимися между $N_{\min}$ и $N_{\max}$:

$$N_{\min} = \frac{DM}{10} - N_X - N_Y, \quad (8)$$

$$N_{\max} = \frac{DM}{6} - N_X - N_Y. \quad (9)$$

Так как при расчете количества нейронов в скрытом слое в некоторых случаях получается не целое значение, его следует округлить в меньшую сторону, что будет способствовать повышению обобщающих свойств ИНС.

На рисунках 4, 5 представлены ИНС, которые применялись для тестирования структуры и метода выбора РР. ИНС 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.

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

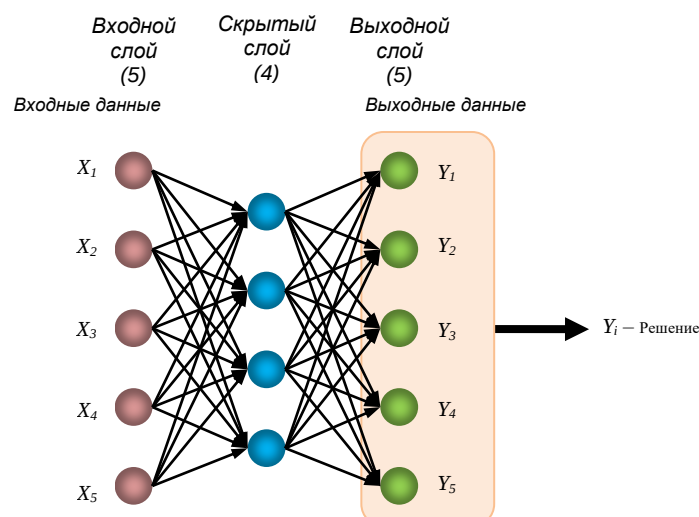


Рисунок 4. Нейросетевая структура выбора регулирующего решения для реализации технологического процесса (разработано автором)

Figure 4. Neural network structure for regulatory solutions selection for the technological process implementation (developed by the author)

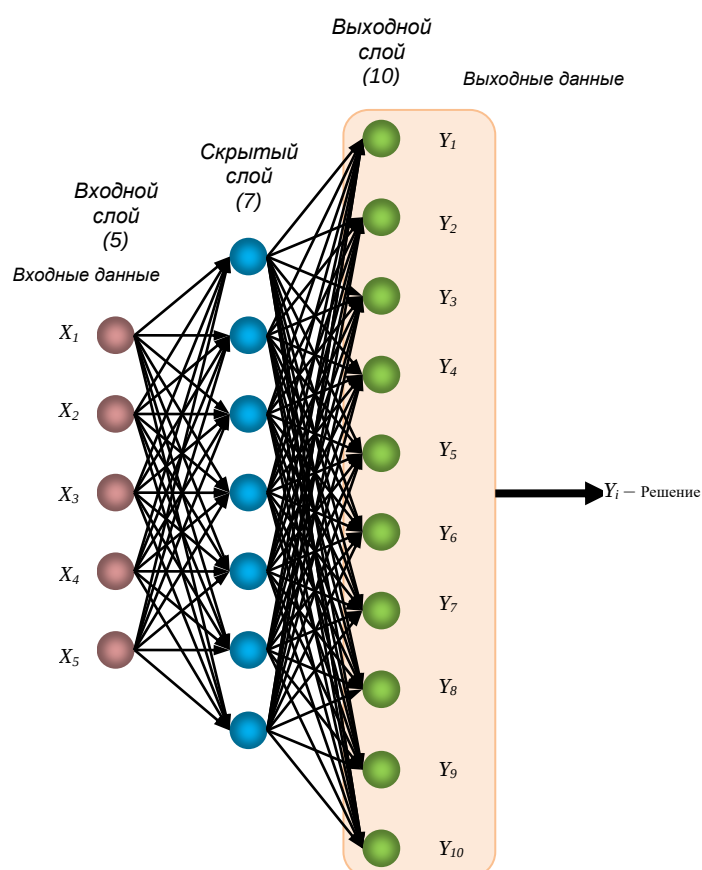


Рисунок 5. Нейросетевая структура выбора регулирующих решений для ресурсного обеспечения технологического процесса (разработано автором)

Figure 5. Neural network structure for the regulatory solutions selection for the technological process resource support (developed by the author)

Обучение ИНС осуществляется по алгоритму обратного распространения ошибки (*Backpropagation algorithm*). Основная идея реализации алгоритма состоит в распространении средней ошибки обучения ИНС в обратном направлении по отношению к основному сигналу, т. е. от выходного слоя к входному с целью ее уменьшения до определенной малой величины [9]. Для этого сначала формируются массивы обучающих данных и тестирующих (для верификации обучения). Затем назначаются случайные значения для синаптических связей (весов), пороговых значений и функции активации на интервале $[0, 1]$, а затем несколько раз повторяются следующие действия:

1. Из обучающей выборки выбираются значения входного сигнала и соответствующее ему значение выходного.
2. Рассчитывается прямое распространение сигнала через ИНС.
3. Для каждого нейрона вычисляются значения весовых сумм S_i и активаторов U_i .
4. Рассчитывается обратное распространение ошибки через нейроны выходного и скрытого слоев — градиент (рис. 6), причем [9]:

- для нейронов выходного слоя:

$$\delta_0 = (C_i - U_5)U_5(1 - U_5), \quad (10)$$

- для нейронов скрытого слоя:

$$\delta_i = \left(\sum_{m:m>i} w_{m,i} \delta_0 \right) U_i (1 - U_i), \quad (11)$$

где m — нейроны скрытого слоя; $w_{i,j}$ — набор значений синаптических связей (весов); U_i — активация нейронов.

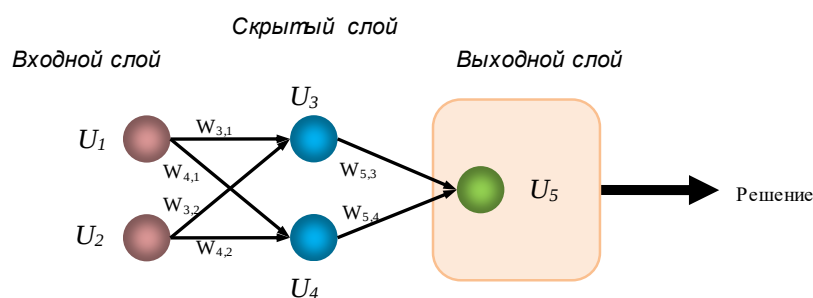


Рисунок 6. Пример трехслойной ИНС для обучения по алгоритму обратного распространения ошибки (разработано автором)

Figure 6. An example of a three-layer artificial neural networks for learning using the backpropagation algorithm (developed by the author)

5. Рассчитываются новые значения весов соединений между слоями ИНС [9]:

- между скрытым и выходным слоями:

$$w_{i,j}^* = w_{i,j} + \rho \delta_0 U_i, \quad (12)$$

- между скрытым и входным слоями:

$$w_{i,j}^* = w_{i,j} + \rho \delta_i U_i. \quad (13)$$

Здесь ρ является коэффициентом обучения (размером шага), ограничивающим возможные пошаговые изменения значений весов.

Качество обучения ИНС можно установить из следующего выражения:

$$\varphi = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2, \quad (14)$$

где p — совокупный объем обучающих данных; y_{ij} — фактическое значение j -го нейрона выходного слоя для i -го набора выборки данных; $\bar{y}_{ij}$ — требуемое значение j -го нейрона выходного слоя для i -го набора выборки данных.

Представленные на рисунках 4 и 5 ИНС характеризуют влияние результатов мониторинга реализации ТП на выбор РР, а их функционирование заключается в определении признаков выходных значений адаптивных сумматоров каждого нейрона (S_{ij} , $i = 1, 3$, $j = 1, \dots, r_i$) и выходных значений нейронов скрытого слоя (P_{ij} , $i = 2$, $j = 1, \dots, r_i$):

- сначала рассчитываются значения нейронов скрытого слоя:

$$S_{2,i} = \sum_{j=1}^n W_{2,i,j} X_j + t_{2,i}, \quad i = 1, \dots, r_2, \quad (15)$$

$$P_{2,i} = \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i} S_{2,i}}}, \quad i = 1, \dots, r_2, \quad (16)$$

- затем рассчитываются значения нейронов выходного слоя:

$$S_{3,i} = \sum_{j=1}^n W_{3,i,j} X_j + t_{3,i}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (17)$$

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{-a_{3,i} S_{3,i}}}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (18)$$

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

Для обучения ИНС использовалась специально подготовленная группа обучающих примеров, состоящих из входных данных (результатов мониторинга реализации ТП) и вариантов РР.

Для тестирования ИНС были использованы данные не входящие в обучающую выборку. Тестирование ИНС показало адекватную выбор варианта РР с учетом результатов мониторинга реализации ТП и особенностей производственной обстановки. Примеры таких решений представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Примеры регулирующих решений

Examples of regulatory solutions

Регулирующее решение Regulatory decision	Описание Description
Замена машины («зТС») Technical equipment	Из резерва СПО необходимо задействовать новый бульдозер, но его технические характеристики будут отличаться от характеристик бульдозера, выводимого в ремонт. It is necessary to use a new bulldozer from the construction organization reserve, but its technical characteristics will differ from the characteristics of the bulldozer being remove out of service.
Уточнение калькуляции затрат труда («уКЗТ») Adjustment labour costs calculation	Необходимо скорректировать перечень работ (ППП) и затраты труда в связи с использованием новой машины. It is necessary to adjust the list of works (simple technological process) and labor costs in connection with the use of a new machine.
Замена геосинтетического материала («зГСМ») Geosynthetic material replacement	Необходима замена геотекстиля на месте повреждения. Replacement of geotextiles at the site of damage is necessary.
Дополнительное уплотнение грунта («дуГ») Redundant soil seal	Необходимо увеличить количество проходов по слою грунта прицепным катком с пневмоколесными шинами. It is necessary to increase the passage number along the soil layer by a trailed roller with pneumatic tires.

Составлено автором / Compiled by the author

В соответствии с выбранным РР 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 реализации ТП и ресурсов.

В том случае, если в коррекции ТП нет необходимости работы продолжаются в соответствии с АЦТР и утвержденным ТСц.

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 интеллектуальной автоматизированной системы (ИАС) и описанный в работах [1–3; 7; 14]. После этого ТП считается готовым к реализации в скорректированной конфигурации.

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 ресурсного обеспечения.

В таблице 4 представлен пример формы с результатами определения регулирующего решения с применением ИНС.

Таблица 4 / Table 4

Пример формы с результатами определения регулирующего решения

Example of a results form of determining the regulatory solution

Смена Shift № 3	ПТП № II.2. (ГЭСН 01-01-031-05) Разравнивание грунта бульдозером Simple technological process No. II.2. (state itemized cost estimate standards 01-01-031-05) Leveling the soil with a bulldozer						
Время Time	Входные данные Input data					Выходной параметр Output parameter	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y _i	
	ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС TECHNOLOGICAL PROCESS						
10:40	30	60	10	20	40	25	Коррекция, уКГ Correction, adjustment graphical schedule
	ТРУДОВЫЕ РЕСУРСЫ WORK RESOURCES						
10:40	10	30	10	40	20	10	Норма Standard
	ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА TECHNICAL EQUIPMENT						
10:40	30	40	10	40	20	35	зТС, уКЗТ Technical equipment replacement, Adjustment labour costs calculation
	МАТЕРИАЛЫ MATERIALS						
10:40	10	20	10	10	80	10	Норма Standard
РЕГУЛИРУЮЩЕЕ РЕШЕНИЕ REGULATORY SOLUTION						Коррекция технологического процесса. Замена машины. Уточнение калькуляции затрат труда. Уточнение календарного графика. Technological process correction. Vehicle replacement. Adjustment labour costs calculation. Adjustment graphical schedule.	

Составлено автором / Compiled by the author

Адекватная генерация действий ИНС в виде РР и формирование ТСЦ позволяют перейти к следующему этапу — применению РР для реализации ТП строительства ОЖДП.

Применение РР предполагает его согласование с профильными подразделениями СПО и последующую передачу исполнителям для реализации. На рисунке 7 представлена оперограмма применения РР. Производственно-технический отдел (ПТО), как разработчик и инициатор применения РР, корректирует калькуляцию затрат труда и передает ее на проверку главному инженеру. Главный инженер проверяет особенности, причины и необходимость применения РР, а затем согласовывает его.

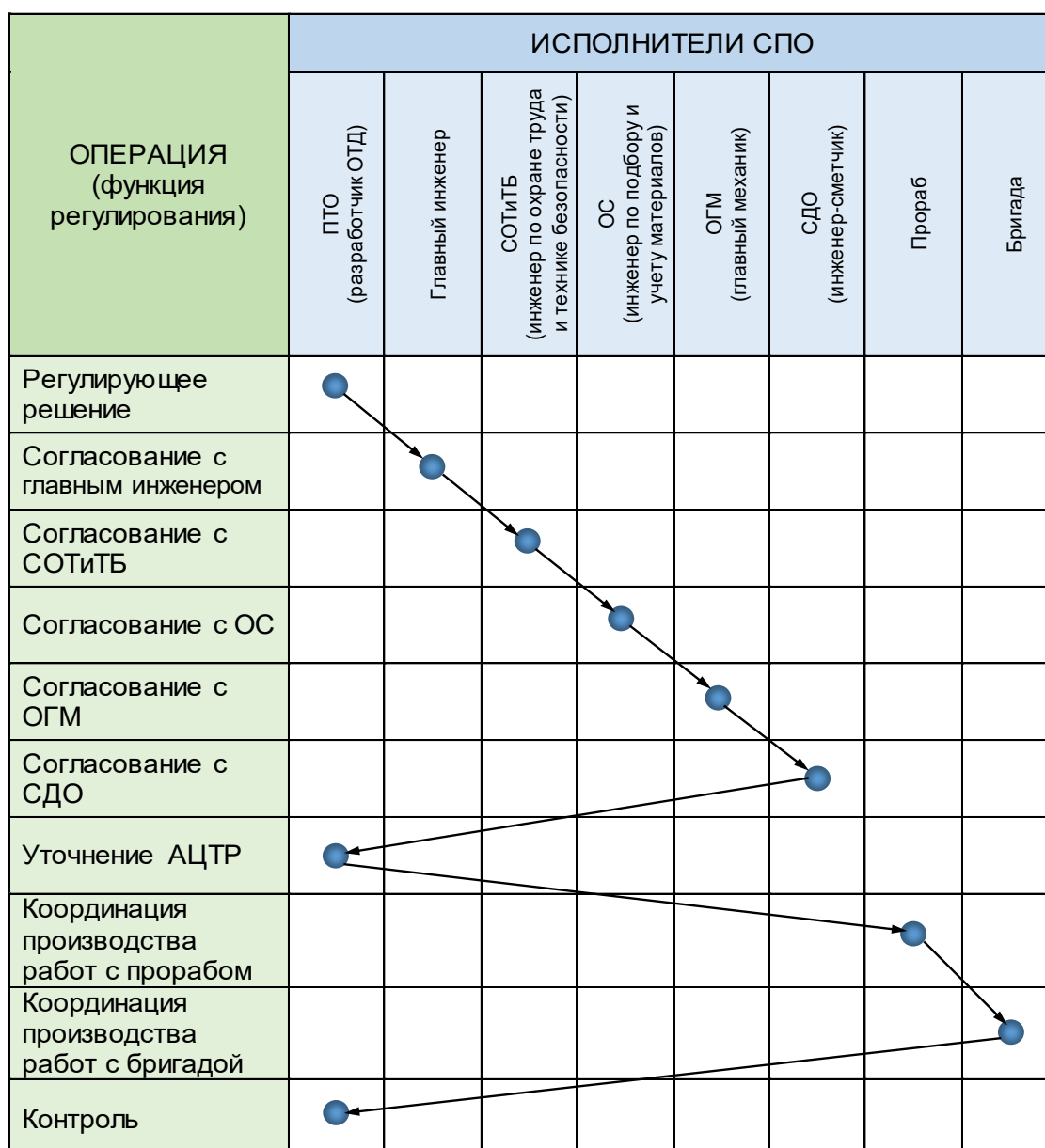


Рисунок 7. Оперограмма применения регулирующего решения (разработано автором)

Figure 7. Operating program of regulatory solution application (developed by the author)

После согласования РР с главным инженером оно передается в службу охраны труда и техники безопасности (СОТиТБ). Инженер по охране труда и технике безопасности проверяет соответствие РР требованиям безопасности, ПОС и ППР. В случае соответствия согласовывает его.

Инженер по подбору и учету материалов (отдел снабжения (ОС)) проверяет и согласовывает соответствие РР в части используемых строительных материалов и конструкций.

Отдел главного механика проверяет и согласовывает соответствие РР в части используемых машин и механизмов, а также потребности в горюче-смазочных материалах.

В сметно-договорном отделе (СДО) инженер-сметчик проверяет соответствие РР стоимости производства работ и согласовывает его.

Результаты согласований фиксируются в соответствующих разделах АЦТР. После уточнения АЦТР производственно-технический отдел координирует производство дальнейших работ с прорабом. Прораб координирует работу бригады в соответствии с РР.

ПТО осуществляет контроль применения РР для реализации ТП строительства ОЖДП.

Оперограмма показывает, что производственно-технический отдел отвечает за выбор РР, выступает инициатором его применения, уточняет (корректирует) АЦТР и контролирует исполнение. Задачами остальных исполнителей СПО является проверка и согласование РР.

В ИАС в форме диалога работает процедура исполнения ТСц, которая интерпретирует его модель и обрабатывает инструкции в его позициях. В этом случае осуществляется реализация ТП до момента времени T , определяемым по формуле (19). Также осуществляется подготовка ТП и ресурсов к реализации скорректированного ТП. С момента времени T реализация ТП осуществляется в соответствии с измененным ТСц:

$$T = -\frac{1}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i} \ln(P_{ТПО}), \quad (19)$$

где λ_i — интенсивности смены состояний ТП [1; 3]; $P_{ТПО}$ — вероятность несоответствия ТП проектным требованиям, (определяется при оценке реализации ТП) [1; 3].

Исполнителями СПО в соответствии с измененным ТСц 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.

Во время реализации ТП снова осуществляется мониторинг на предмет удовлетворения проектным требованиям. В случае неудовлетворения требованиям текущая конфигурация ТП снова корректируется.

2. Практические аспекты регулирования технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети

2. Practical aspects of regulating the technological process of railway track entity construction using an artificial neural network

Для практической реализации регулирования ТП строительства ОЖДП используются экспериментальные программные модули ИАС:

- «Решение» реализует интеллектуальный режим выбора РР для корректировки ТП. Включает в себя БД (упорядоченную совокупность сведений о процедуре и результатах выбора РР) и нейросимулятора. Работа нейросимулятора осуществляется совместно с выборкой данных «Решение» — хранилища обучающих и тестовых примеров для ИНС.
- «Регулирование» позволяет в автоматизированном режиме осуществлять проверку и согласование РР с последующей его передачей в АЦТР, корректировать ТСц, а также координировать работу прораба и бригады.

Данные, получаемые в модулях подсистемы ИАС «Регулирование», передаются (при необходимости) в соответствующие разделы АЦТР для последующего уточнения/изменения ТСц [3; 7].

Для примера практического воплощения регулирования 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 [1–3; 7; 14] и других работах автора были рассмотрены этапы разработки ТП в рамках инженерно-интеллектуального обеспечения возведения участка указанной

насыпи. В статье [7] 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 реализации ТП для смены № 3, соответствующей работе (ПТП) «П.2. (ГЭСН 01-01-031-05) Разравнивание грунта бульдозером» [1; 3; 7].

По результатам мониторинга были предложены решения, направленные на обеспечение плановых показателей ТП [3]. Для этого был использован модуль ИАС «Решение» подсистемы «Регулирование». На рисунках 8–10 показаны этапы формирования, настройки и обучения ИНС.

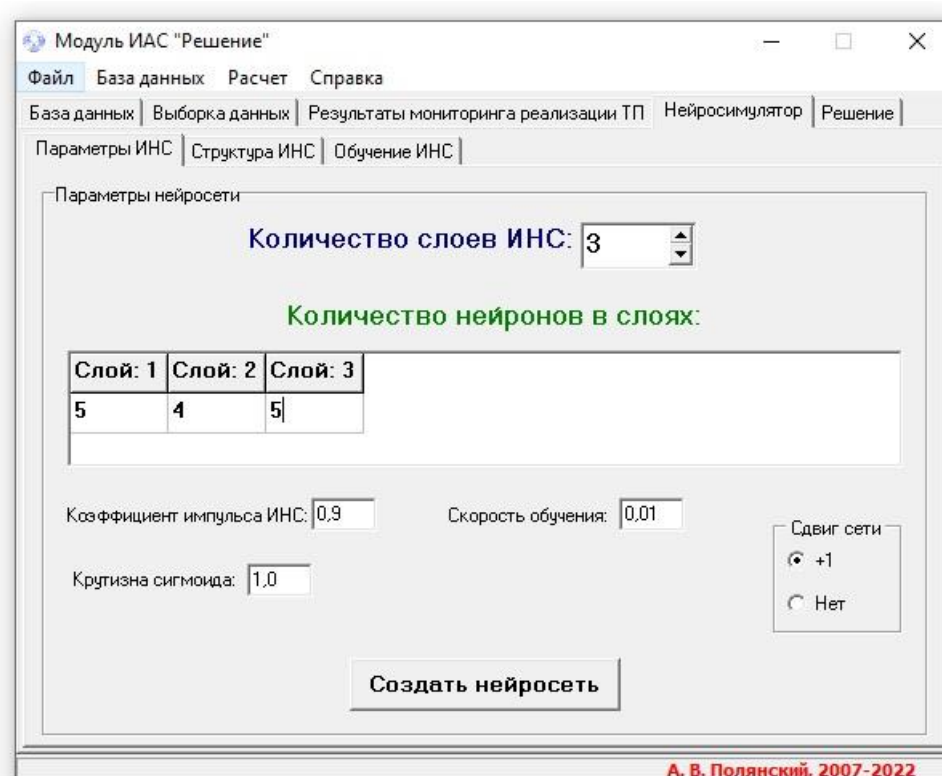


Рисунок 8. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Параметры ИНС» (разработано автором)

Figure 8. A fragment of the software module work intelligent automated systems «Solution», the mode «Neurosimulator — artificial neural networks parameters» (developed by the author)

Данные были переданы ИНС в произвольном порядке во время обучения с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. График снижения средней ошибки показан на рисунке 11, где по оси абсцисс показано количество эпох (циклов последовательного предъявления выборки данных для обучения ИНС), а по оси ординат размер ошибки обучения.

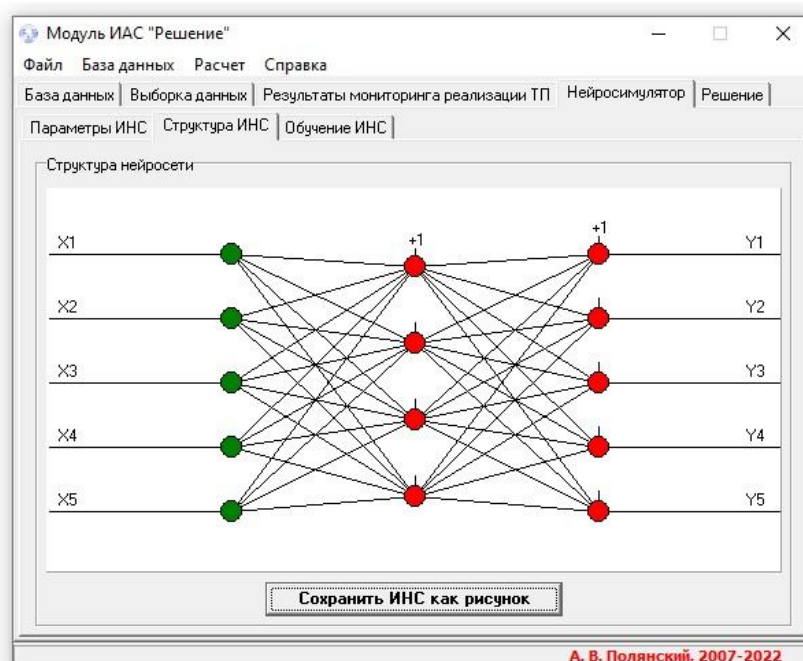


Рисунок 9. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Структура ИНС» (разработано автором)

Figure 9. A fragment of the work of the intelligent automated systems software module «Solution», the mode «Neurosimulator — artificial neutral networks Structure» (developed by the author)

Рисунок 10. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Обучение ИНС» (разработано автором)

Figure 10. A fragment of the work of the software module intelligent automated systems «Solution», the mode «Neurosimulator — artificial neutral networks Training» (developed by the author)



Рисунок 11. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Нейросимулятор — Ошибка обучения ИНС» (разработано автором)

Figure 11. A fragment of the work of the IAS software module «Solution», the mode «Neurosimulator — artificial neural networks training error» (developed by the author)

В большинстве случаев ИНС успешно проходит обучение на представленных примерах из выборки данных. Качество обучения ИНС было обеспечено несколькими запусками, в результате которых удалось добиться наилучшего результата с использованием тестовых данных.

Тестирование обученной ИНС осуществлено с применением новых примеров, что позволило понять реакцию ИНС на результаты мониторинга реализации ТП, о которых ей ничего не известно. Данные тесты показали возможности ИНС генерировать и выполнять нужные действия, реагируя на результаты мониторинга, которым ее не обучали, но она способна правильно на них реагировать.

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. Данное обстоятельство вызвало необходимость в регулировании реализации ТП и заключалось оно в исполнении следующих решений (рис. 12):

- «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.

На рисунке 12 представлен фрагмент работы программного модуля в режиме выбора РР. В блоке «Регулирующее решение» решения представлены в сокращенном виде.

	Результат	ИП вероятности	ИП времени	ИП объема	Xi
Оценка реализации ТП	Отклонение (0.975)	30	..	..	30
Прогноз реализации ТП	Развивающийся (0.783)	60	..	..	60
Время до завершения смены	5,3 часа	..	10	..	10
Время до завершения ТП	432,3 часа	..	20	..	20
Выполненный объем работ	40%	..	..	40	40

Технологический процесс	Трудовые ресурсы	Технические средства	Материал
Коррекция, уКГ	норма	зТС, уКЗТ	норма

Рисунок 12. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Решение», режим «Решение» (разработано автором)

Figure 12. A fragment of the work of the software module intelligent automated systems «Solution», mode «Solution» (developed by the author)

На рисунке 13 представлен фрагмент работы программного модуля ИАС «Регулирование» в режиме «Оперограмма», где отражены результаты проверок и согласований РР с профильными подразделениями СПО (ячейки зеленого цвета подтверждают согласование РР, а серого цвета — показывают, что РР находится в процессе исполнения (согласования)).

На рисунке 14 представлен режим «Учет исполнения РР», показывающий ситуацию и действия СПО, направленные на компенсацию отклонений от проектных требований при реализации ТП возведения подтопляемой насыпи.

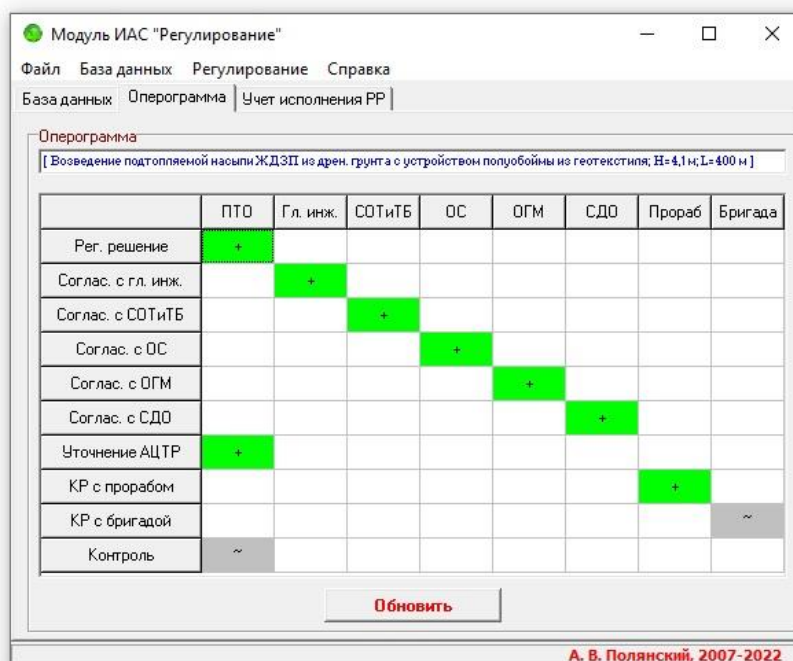


Рисунок 13. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Регулирование», режим «Оперограмма» (разработано автором)

Figure 13. A fragment of the operation of the intelligent automated system software module «Regulation», mode «Operogram» (developed by the author)

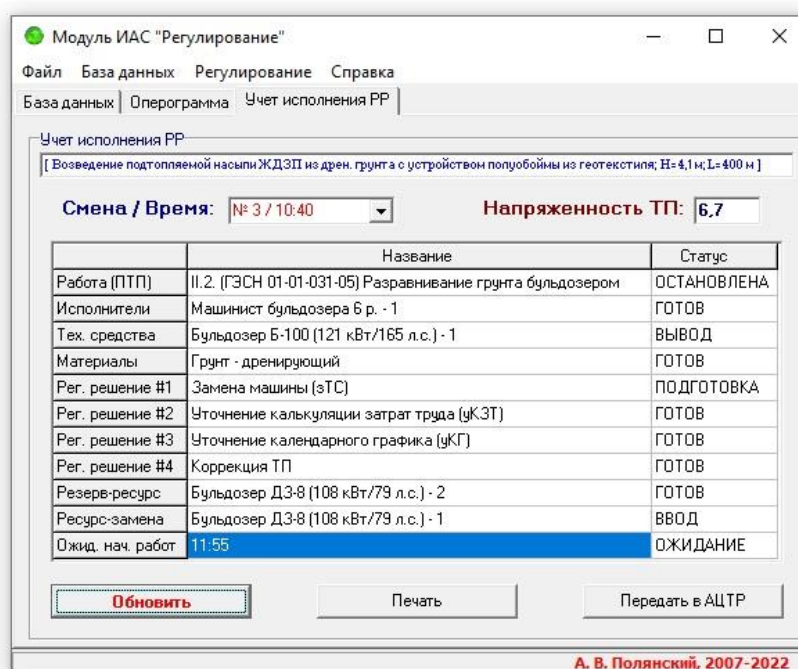


Рисунок 14. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Регулирование», режим «Учет исполнения РР» (разработано автором)

Figure 14. A fragment of the operation of the intelligent automated systems «Regulation» software module, the «Accounting for the execution of the RR» mode (developed by the author)

Представленные фрагменты работы подсистемы ИАС «Регулирование» показывают некоторые возможности 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 регулирования процессов производства работ в ЖДС с применением ИНС.

В рамках формирования методологии ИИОТП ЖДС была разработана система регулирования реализации ТП строительства ОЖДП. С целью улучшения технологического обоснования и управления ЖДС, а также повышения эффективности строительства ОЖДП предлагается решать задачи регулирования реализации ТП в автоматизированном и интеллектуальном режимах. Для этого были описаны:

- взаимосвязи между результатами мониторинга реализации ТП и выбором РР;
- модель ИНС выбора РР для реализации ТП;
- процедура применения РР для корректировки (компенсации отклонений от проектных требований) ТП.

На основе созданных расчетных и расчетно-логических моделей были разработаны экспериментальные программные модули подсистемы ИАС «Регулирование». Практическое применение модулей для строительства участка подтопленной насыпи ЖДЗП позволило обеспечить регулирование реализации ТП в меняющихся условиях производства работ с целью обеспечения 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> (дата обращения: 07.11.2022).

2. **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: 18.02.2023).
3. **Полянский, А.В.** Мониторинг процессов производства работ в железнодорожном строительстве с применением экспертных технологий / А.В. Полянский. — DOI: <https://doi.org/10.15862/06SATS123> // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS123.pdf>. (дата обращения: 9.05.2023).
4. **Нейман, А.О.** Системное управление ресурсопотоками строительных процессов: Монография / А.О. Нейман. — М.: Маршрут, 2006. — 140 с.
5. **Яблонский, А.А.** Моделирование систем управления строительными процессами: Монография / А.А. Яблонский. — М.: АСВ, 1994. — 300 с.
6. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / под редакцией А.А. Большакова. — 2-е изд. — М.: «Горячая линия-Телеком», 2016. — 160 с.
7. **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>. (дата обращения: 05.04.2023).
8. **Каклаускас А.** Биометрическая и интеллектуальная поддержка решений: монография / А. Каклаускас, Э.К. Завадскас. — Вильнюс: Техника, 2012. — 344 с.
9. **Джонс, М.Т.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях / М.Т. Джонс. — Пер. с англ. Осипов А.И. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 312 с.
10. **Tariq R.** Make your own network / R. Tariq. — Скоттс Вэлли: Createspace Independent Publishing Platform, 2016. — 224 p.
11. **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. — V 6. — № 1. — P. 50–60. — URL: <http://journals.iasdm.org/index.php/ijaec/article/view/401> (дата обращения: 02.03.2023).
12. **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. — V 122. — P. 228–234. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815031185> (дата обращения: 11.04.2023).
13. **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. — V 31. — № 1. — P. 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).
14. **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. — URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS321.pdf>. (дата обращения: 12.02.2023).
15. **Ясницкий, Л.Н.** Нейронные сети — инструмент для получения новых знаний: успехи, проблемы, перспективы / Л.Н. Ясницкий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2015. — № 5. — С. 48–56. — URL: https://www.researchgate.net/publication/293657344_Nejronnye_seti_-_instrument_dla_polucenia_novyh_znaniy_uspehi_problemy_perspektivy (дата обращения: 09.01.2023).
16. **Gazder U.** Artificial Neural Network Model to relate Organization Characteristics and Construction Project Delivery Methods / U. Gazder, E. Shakshuki, M. Adnan, A. Yasar. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.144> // Procedia Computer Science. — 2018. — V 134. — P. 59–66. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918311074> (дата обращения: 30.03.2023).

17. **Zhang G.** Forecasting with artificial neural networks: The state of the art / G. Zhang, B.E. Patuwo, M.Y. Hu. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(97\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(97)00044-7) // International Journal of Forecasting. — 1998. — V 14. — № 1. — P. 35–62. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169207097000447> (дата обращения: 26.03.2023).
18. **Aneta, K.** Abductive and Deductive Approach in Learning from Examples Method for Technological Decisions Making / K. Aneta, P. Jerzy. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.074> // Procedia Engineering. — 2013. — V 57. — P. 583–588. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813008072> (дата обращения: 24.03.2023).
19. **Flood I.** Modeling construction processes using artificial neural networks / I. Flood, P. Christophilos. — DOI [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0926-5805(95)00011-9) // Automation in Construction. — 1996. — V 4. — № 4. — С. 307–320. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0926580595000119> (дата обращения: 11.04.2023).
20. **Gazder U.** Artificial Neural Network Model to relate Organization Characteristics and Construction Project Delivery Methods / U. Gazder, E. Shakshuki, M. Adnan, A. Yasar. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.144> // Procedia Computer Science. — 2018. — V 134. — P. 59–66. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918311074> (дата обращения: 27.02.2023).

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: 12.05.2023. Принята к публикации: 20.07.2023. Опубликовано онлайн: 03.08.2023.

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). Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS322.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/05SATS322.
2. 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>.
3. Polyanskiy A.V. Monitoring of work execution processes in railway construction using expert technologies. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023; 10(1). Available at: <https://t-s.today/PDF/06SATS123.pdf> (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15862/06SATS123>.
4. Neyman A.O. Sistemnoye upravleniye resursopotokami stroitel'nykh protsessov: Monografiya [System management of resource flows of construction processes: Monograph]. Moscow: Marshrut; 2006. (In Russ.).
5. Yablonskiy A.A. Modelirovaniye sistem upravleniya stroitel'nyimi protsessami: Monografiya [Modeling of building process control systems: Monograph]. Moscow: ASV; 1994. (In Russ.).
6. Bol'shakov A.A. ed. Intellektual'nyye sistemy upravleniya organizatsionno-tekhnicheskimi sistemami [Intelligent management systems for organizational and technical systems]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2006. (In Russ.).
7. 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). Available at: <https://t-s.today/PDF/03SATS122.pdf> (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS122>.
8. Kaklauskas A., Zavadskas E. Biometricheskaya i intellektual'naya podderzhka resheniy: monografiya [Biometric and Intelligent Decision Support: Monograph]. Vilnius: Technika; 2012. (In Russ.).

9. Jones M.T. AI Application Programming. Hingham, Massachusetts: Charles River Media; 2003. (In Eng.).
10. Tariq R. Make your own network. Scotts Valley: Createspace Independent Publishing Platform; 2016. (In Eng.).
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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). Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS321.pdf> (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15862/01SATS321>.
15. Yasnitsky L.N. Neural networks — a tool for mining of new knowledge: progress, problems and prospects. Journal Neurocomputers. 2015; (5): 48–56. Available at: https://www.researchgate.net/publication/293657344_Nejronnye_seti_-_instrument_dla_polucenia_novykh_znaniy_uspehi_problemy_perspektivy (accessed 9th January 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Gazder U., Shakshuki E., Adnan M., Yasar A. Artificial Neural Network Model to relate Organization Characteristics and Construction Project Delivery Methods. Procedia Computer Science. 2018; 134: 59–66. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.144>.
17. Zhang G., Eddy Patuwo B., Y. Hu M. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. International Journal of Forecasting. 1998; 14(1): 35–62. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(97\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(97)00044-7).
18. Aneta K., Jerzy P. Abductive and Deductive Approach in Learning from Examples Method for Technological Decisions Making. Procedia Engineering. 2013; 57: 583–588. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.074>.
19. Gajzler M., Konczak A. The idea of knowledge supplementation and explanation using neural networks to support decisions in construction engineering. Procedia Engineering. 2013; 57: 302–309. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.041>.
20. Flood I., Christophilos P. Modeling construction processes using artificial neural networks. Automation in Construction. 1996; 4(4): 307–320. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0926-5805(95)00011-9).

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: 12th May 2023. Revised: 20th July 2023. Published online: 3rd August 2023.