

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ ИНВЕНТАРНЫХ КОМПЛЕКТОВ

ЯШИН Михаил Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры¹; e-mail: maik1771@rambler.ru
ПАНТЕЛЕЕВ Роман Анатольевич, канд. техн. наук, старший преподаватель¹; e-mail: pantel98@mail.ru
КУШПИЛЬ Игорь Васильевич, канд. техн. наук, старший преподаватель²; e-mail: i_kushpil@mail.ru
ФОМИН Никита Николаевич, курсант кафедры¹; e-mail: fomin.nik04@gmail.com

¹Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, кафедра «Восстановления устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах», Санкт-Петербург

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Санкт-Петербург

При возникновении перерыва в движении железнодорожных поездов по причине воздействия чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера необходимо скорейшее восстановление нормальной, устойчивой и безопасной работы железнодорожного транспорта в целом. При этом если рассматривать железнодорожный транспорт как систему, то изменения, протекающие в этой системе в случае подобного рода воздействия, возможны только над ее математической моделью, которая строится для описания функционирования инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях воздействия чрезвычайных ситуаций и реализуется в имитационной модели. Для повышения оперативности и эффективности восстановительных мероприятий авторами предлагается применение станционных напольных восстановительных комплектов, включающих в себя напольные устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. В статье описывается имитационная модель работы инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом применения станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики, которая позволяет проводить эксперименты, рассчитать требуемое количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях, а также оценить эффективность выполняемых восстановительных работ в условиях воздействия чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: инфраструктура железнодорожного транспорта; железнодорожная станция; восстановление прерванного движения; способы восстановления; непрерывность работы железнодорожной станции; станционный восстановительный комплект железнодорожной автоматики и телемеханики.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-354-366

▼ Введение

Под инфраструктурой железнодорожного транспорта (далее — ИЖДТ) понимается технологический комплекс, включающий в себя железнодорожные пути (общего и необщего пользования) и другие сооружения, железнодорожные станции, устройства электроснабжения, сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы, систему управления движением и иные, обеспечивающие функционирование

этого комплекса здания, строения, сооружения, устройства и оборудование¹.

Если рассматривать железнодорожный транспорт как систему в целом, а перевозки как процесс, на который направлено функционирование этой системы, то одной из сложнейших

¹ГОСТ 34530—2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 58 с.
 СП 237.1326000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования. — М.: Минтранс России, 2015. — 57 с.

подсистем, оказывающей непосредственное влияние на обеспечение безопасного движения поездов, а также требуемого объема перевозок (пропускной и провозной способности), является система железнодорожной автоматики и телемеханики (далее — ЖАТ) — подсистема ИЖДТ, включающая в себя комплекс технических сооружений и устройств, обеспечивающих безопасное управление движением поездов на перегонах, станциях и маневровой работой². Полноценное функционирование ИЖДТ без системы ЖАТ невозможно. В то же время железные дороги подвержены воздействию чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) природного, техногенного и биолого-социального характера, которые могут привести к разрушению объектов ИЖДТ или изменению его состояния. Опасное состояние и разрушение систем ЖАТ повлечет за собой нарушение графика движения поездов, снижение пропускной и провозной способности железных дорог (неполноценное функционирование ИЖДТ), а также человеческие жертвы. Вследствие этого при организации работ по восстановлению объектов ИЖДТ определяющее значение играет оперативность восстановления системы ЖАТ, так как длительность цикла восстановления, в зависимости от складывающейся обстановки и степени (объема) разрушений, может составлять до нескольких суток, что скажется на эффективности работы ИЖДТ.

Восстановление системы ЖАТ на объекте ИЖДТ после воздействия ЧС возможно тремя способами [1]:

- восстановление существующей системы ЖАТ;
- переход на другие (более простые) системы ЖАТ;
- монтаж взамен разрушенных устройств типовых инвентарных комплексов (комплектов).

Первое решение может быть принято при незначительном разрушении объекта ИЖДТ и частичном разрушении устройств ЖАТ, а также при наличии аварийно-восстановительного запаса и квалифицированных специалистов.

² ТР ТС 003/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта». — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293439>.

По второму решению получается, что если заранее согласиться с необходимостью перехода на более простые системы ЖАТ (например, от электрической централизации (далее — ЭЦ) к ручному управлению стрелками), то значит примириться с резким снижением размеров движения, со срывом плана перевозок и с необходимостью привлечения на объект ИЖДТ дополнительного количества людей.

В [1] для быстрого развертывания оперативного управления устройствами ЭЦ на объекте ИЖДТ в случаях повреждений постов и устройств ЭЦ при землетрясениях, взрывах, пожарах, затоплениях и других катаклизмах (ЧС) как в мирное, так и в военное время предлагается использовать:

- мобильный комплекс «Инвентарный пост управления МК ЭЦ-ИН», разработанный в ООО «ПОЛИВИД» [2];

- мобильную электрическую централизацию стрелок и сигналов на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров (ЭЦ-МПК-М), предложенную Центром компьютерных железнодорожных технологий Петербургского государственного университета путей сообщения (ЦКЖТ ПГУПС) [3];

- мобильный комплекс микропроцессорной системы управления стрелками и светофорами участка железной дороги (МК МПЦ), разработанный в ОАО «РЖД» [4].

Тем не менее вышеперечисленные технические системы в своем составе содержат только постовое оборудование. Мы полагаем, что для полноценного функционирования ИЖДТ в условиях воздействия ЧС использование существующих комплексов (ЭЦ-МПК-М, МК МПЦ или МК ЭЦ-ИН) требует их доукомплектования стационарным напольным восстановительным комплектом железнодорожной автоматики и телемеханики (СНВК-ЖАТ) [5, 6].

В данной статье описывается имитационная модель работы ИЖДТ с учетом применения СНВК-ЖАТ (далее — ИМ-ЖАТ), которая позволяет проводить эксперименты, рассчитать потребное количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов на станциях, а также оценить эффективность выполняемых восстановительных работ в условиях воздействия ЧС.

1. Обобщение основных параметров моделирования работы инфраструктуры железнодорожного транспорта

Исследование процессов работы ИЖДТ в условиях воздействия ЧС как сложной организационно-технической системы путем прямых экспериментов невозможно, а над ее подсистемами вследствие эмерджентности практически бесполезно. Безусловно, в этих условиях вместо эксперимента над действительной системой проводится эксперимент над ее математической моделью, которая строится для описания функционирования ИЖДТ в условиях воздействия ЧС и реализуется в имитационной модели — ИМ-ЖАТ.

В ИМ-ЖАТ исследуемую железную дорогу представим в виде графа $G = \{U, E\}$, где $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_s\}$ — совокупность железнодорожных станций различного типа и $E = \{e_{ij}\}$ — множество участков (перегонов) между ними. Для ИМ-ЖАТ границы определяются пределами функционирования железнодорожных станций, а процессы, связанные с железнодорожными участками (перегонами), вынесены в ограничение.

ИМ-ЖАТ имеет цель определить требуемое количество СНВК-ЖАТ для выполнения заданного объема перевозок и оценить показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции ($k_{\text{ждс}}$) с их применением. Следовательно, формулировка задачи ИМ-ЖАТ будет иметь следующий вид:

$$F_{\text{иждт}} = \begin{cases} R_{\text{снвк}} = [r_j] \\ k_{\text{ждс}} = \frac{N_{\text{пс}}^{\text{фак}}}{N_{\text{пс}}^{\text{зад}}} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (1)$$

где $R_{\text{снвк}} = [r_j]$ — количество требуемых j -х СНВК-ЖАТ, компл., здесь $j = 1, 2, \dots, 7$;

$N_{\text{пс}}^{\text{фак}}, N_{\text{пс}}^{\text{зад}}$ — фактическая и заданная пропускная способность, поезд/сут.;

$k_{\text{ждс}}$ — показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции, ед., выражает связь между компонентами эффективности структуры объекта ИЖДТ и в то же время может являться оценочным показателем эффективности выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов:

$$k_{\text{ждс}} = \frac{\exp\left[-T_{\delta} \cdot \sum_{n=1}^{N_f} \lambda_{\text{оп}}(T_{\delta}) \cdot (1 - k_{\text{бдп}})\right]}{\alpha_n} \cdot k_{\text{вждс}}^{\text{пут}}, \quad (2)$$

где N_f — общее число факторов, способных перевести объект ИЖДТ в f -е опасные состояния при воздействии ЧС, ед.;

$\lambda_{\text{оп}}(T_p)$ — интенсивность опасных отказов за расчетное время T_p , 1/ч;

α_n — нормированный коэффициент надежности, учитывающий влияние отказов в работе технических средств, $\alpha_n = 0,83 \dots 0,96$;

$k_{\text{вждс}}^{\text{пут}}$ — показатель технико-эксплуатационной работы восстанавливаемой железнодорожной станции, ед., определяющий снижение пропускной способности от количества восстанавливаемых путей;

$k_{\text{бдп}}$ — показатель обеспечения безопасности движения поездов, ед. обоснованного в [7].

Основным параметром модуля моделирования работы ИЖДТ являются модели работы железнодорожных станций, рассмотренные в [8], которые можно описать матрицей:

$$F_{\text{ждс}}^{\text{иждт}} \in [F_{\text{ждс}_{su}}] \in \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1u} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{s1} & f_{s2} & \dots & f_{su} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $F_{\text{ждс}_{su}}$ — модель работы железнодорожной станции s -го типа с u -ми характеристиками (наименованием, категорией (типом, классом) станции, производимой работы на ней, принципиальной схемой, включающей количество путей, длину (полную и полезную) с вместимостью вагонов, а также координаты широты и долготы каждой железнодорожной станции и т. п.).

Причинами повреждений станционных устройств ЖАТ могут быть как аварии и поломки самих устройств, так и воздействие разнообразных ЧС, в том числе при ведении боевых действий и совершении террористических актов.

Высокая степень неопределенности данных о характере ЧС определяет необходимость оценки разрушения ИЖДТ с применением математических методов и моделей. В соответствии с теорией вероятности [9, 10] полная вероятность совместных независимых событий определяется:

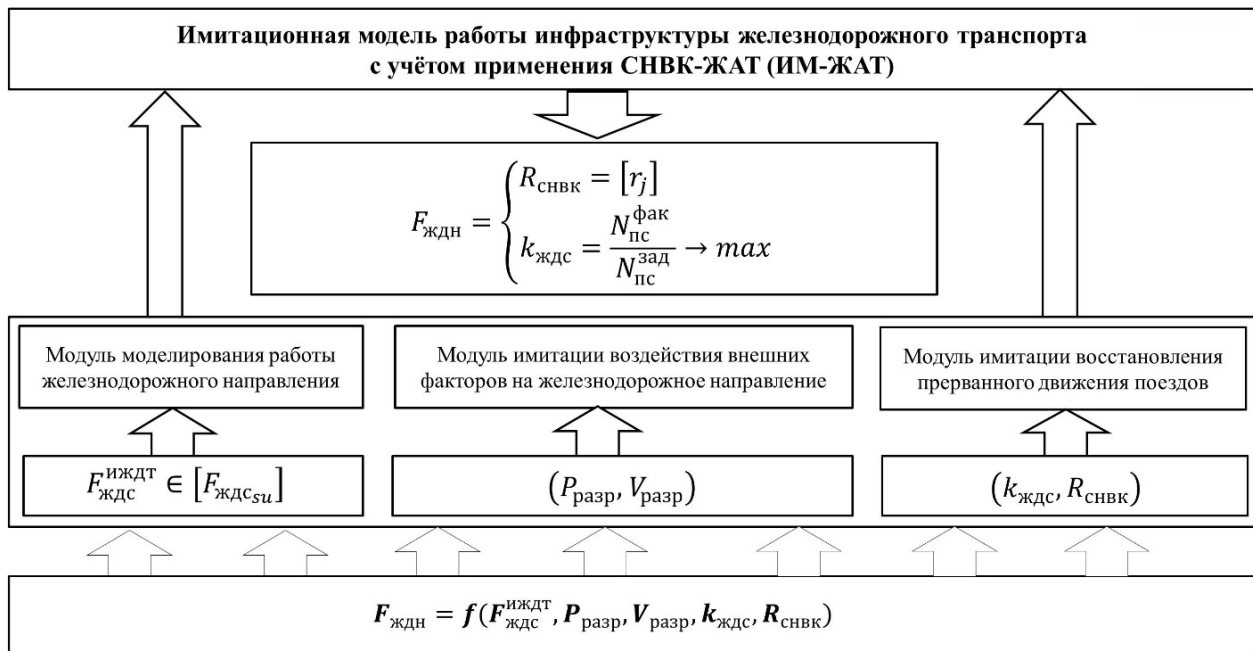


Рис. 1. Обобщенная схема построения взаимосвязи модулей в ИМ-ЖАТ

$$P\left(\prod_{i=1}^n X_i\right) = \prod_{i=1}^n P(X_i), \quad (4)$$

где X_i — i -е независимое событие, связанное с воздействием ЧС.

На завершающей стадии моделирования воздействия ЧС анализируются разрушенные и уцелевшие объекты ИЖДТ и выводятся результаты объемов разрушений: $V_{разр} = \{S_u; l_{ст_u}; m_{П_u}^{ждс}; m_{Т_u}^{ждс}\}$ (типология, количество и характеристика разрушенных железнодорожных станций, в том числе и количество станционных путей). При необходимости проводится корректировка данных по объемам разрушений.

Таким образом, основными обобщенными параметрами модуля имитации воздействия ЧС являются вероятность и объемы разрушения $(P_{разр}, V_{разр})$.

В модуле имитации восстановления ИЖДТ выполняется основная задача ИМ-ЖАТ. Рассчитывается требуемое количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов на станциях, а также оценивается эффективность выполняемых восстановительных работ в условиях воздействия ЧС. Для этого используются методики, разработанные авторами [5, 11], в которых решен вопрос расчета требуемого минимального напольного оборудования $(R_{снвк})$, необходимого для скорейшего

открытия прерванного движения поездов на восстанавливаемой станции.

Далее рассчитываются трудозатраты и определяется продолжительность выполнения восстановительных работ первого и второго этапов $T_{восст} = t_{восст}^I + t_{восст}^{II}$. Сведения для расчета трудозатрат поступают из нормативных документов и баз данных технологических процессов эксплуатации и восстановления устройств ЖАТ [12].

Постановка задачи определения рационального способа восстановления прерванного движения поездов на разрушенной железнодорожной станции $(k_{ждс}^P)$ имеет следующий вид:

$$k_{ждс}^P(y) \rightarrow \max, \text{ при } y \in (1, 2, \dots, Y), \quad (5)$$

где Y — количество альтернативных способов восстановления прерванного движения поездов, попадающих под процедуру сравнения, ед.

Рассчитанный согласно (2) показатель обеспечения непрерывности работы разрушенной станции $(k_{ждс}^P)$ сравнивается с нормативным показателем $(k_{ждс}^{отгф})$ и при условии $k_{ждс}^P \geq k_{ждс}^{отгф}$ выводит результаты имитационного моделирования для статистической обработки. При невыполнении данного условия проводится корректировка данных.

Стало быть, обобщенными параметрами этого модуля являются показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной

станции ($k_{\text{жлс}}$) и выходной параметр — общее количество СНВК-ЖАТ ($R_{\text{снвк}}$), включаемое в аварийно-восстановительный запас.

Подводя итоги выше сказанного, в самом общем виде структуру ИМ-ЖАТ можно представить графически с помощью обобщенной схемы взаимосвязанных модулей (рис. 1) и математическим выражением:

$$F_{\text{ИЖДТ}} = f(F_{\text{жлс}}^{\text{ИЖДТ}}, P_{\text{разр}}, V_{\text{разр}}, k_{\text{жлс}}, R_{\text{снвк}}). \quad (6)$$

Теперь, когда определены цели, задачи, структура ИМ-ЖАТ и обобщены основные параметры моделирования работы ИЖДТ с учетом применения нового СНВК-ЖАТ, необходимо конкретизировать ИМ-ЖАТ и приступить к ее реализации.

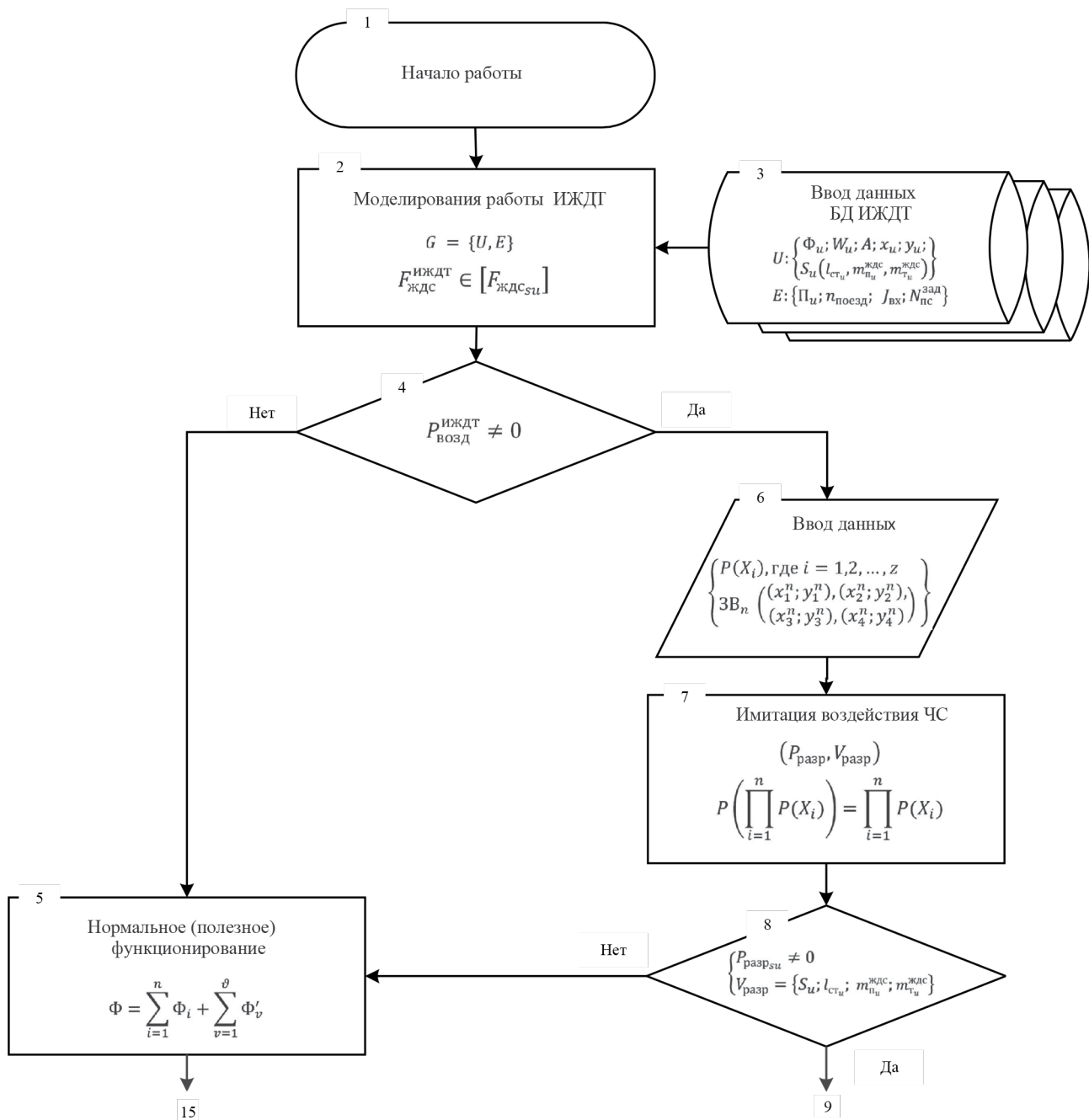


Рис. 2. Блок-схема ИМ-ЖАТ

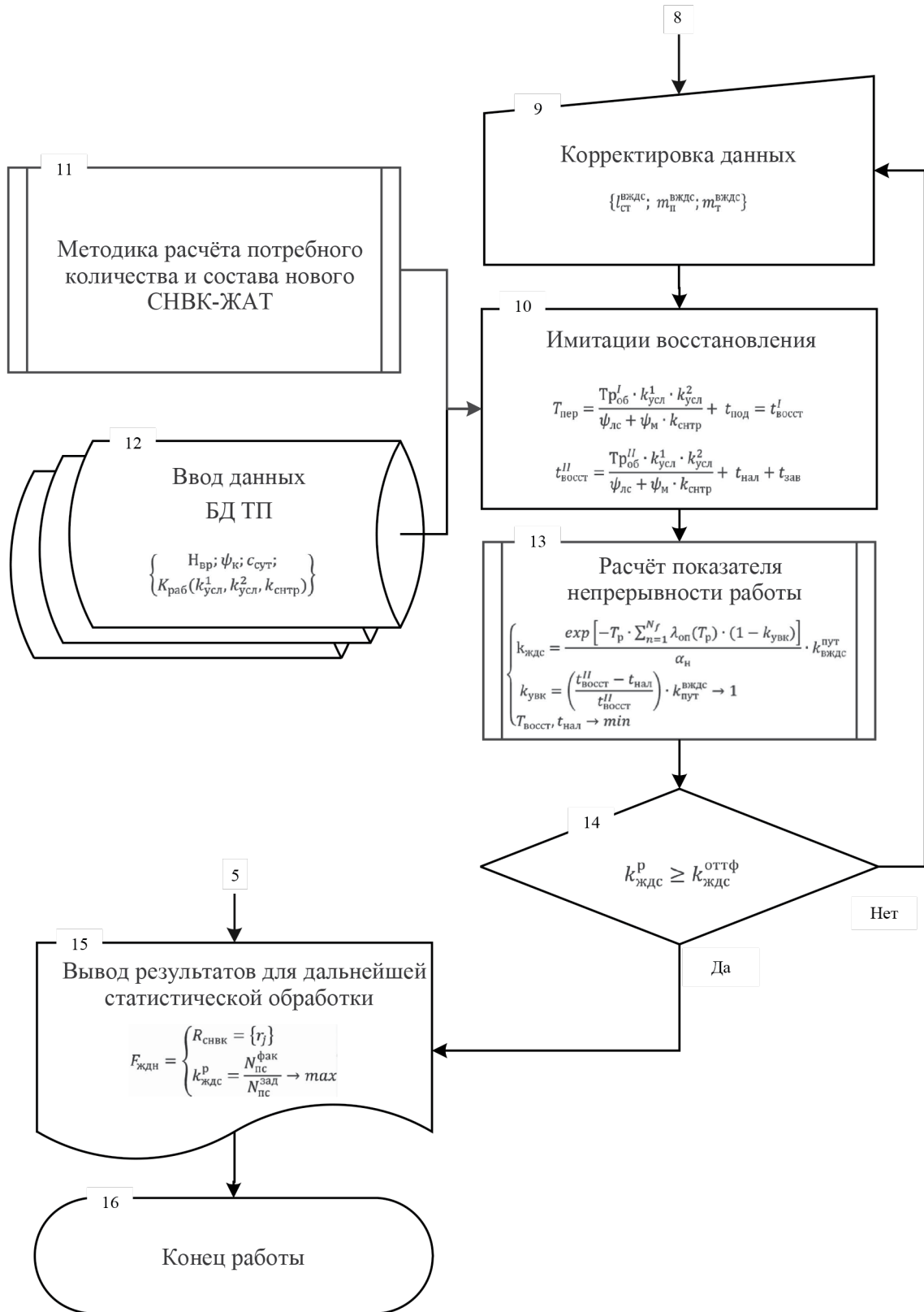


Рис. 2. Блок-схема ИМ-ЖАТ (продолжение)

Таблица 1. Массивы данных для реализации модуля моделирования работы ИЖДТ

Исходные данные ИМ-ЖАТ		Источники получения информации по показателям моделирования
Вид (характеристика) исходной информации	Обозначение по тексту	
Железнодорожная сеть, на которой находится исследуемая ИЖДТ	G	$G = \{U, E\}$
Совокупность железнодорожных станций различных категорий (типов, классов)	U	$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$
Множество участков (перегонов) между железнодорожными станциями	E	$E = \{e_{ij}\}$
Модель работы железнодорожной станции s -го типа с u -ми характеристиками	$F_{\text{жлс}_{su}}$	БД ИЖДТ ¹ [14] вводится (устанавливается) пользователем
Принципиальная схема железнодорожной станции	S_u	БД ИЖДТ [14]
Длина железнодорожной станции (полная и полезная) с вместимостью вагонов	$l_{\text{ст}_u}$	
Количество станционных путей	$m_{\text{пу}}^{\text{жлс}}$	
Количество путей специального назначения (тупики, подъездные пути)	$m_{\text{ту}}^{\text{жлс}}$	
Географические координаты широты и долготы каждой железнодорожной станции	$x_u; y_u$	
Технические элементы железнодорожной станции	A	
Определенный размер (объем) транспортной работы, производимой железнодорожной станцией	W_u	рассчитывается согласно выражению (8)
Нормальное (полезное) функционирование железнодорожной станции	Φ_u	
Подходы к железнодорожной станции, протяженность и тип перегона с видом тяги на нем	Π_u	БД ИЖДТ [14]
Суммарный поездопоток	$n_{\text{поезд}}$	вводится (устанавливается) пользователем
Интервалы поступления поездов	$J_{\text{вх}}$	
Требуемая пропускная способность	$N_{\text{пс}}^{\text{тр}}$	

¹ БД ИЖДТ — База данных инфраструктуры железнодорожного транспорта.

2. Имитационная модель работы инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом применения станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики

ИМ-ЖАТ представляет собой программу, реализованную на компьютере [13], и состоит из трех модулей, включающих несколько блоков (рис. 2), объединенных между собой массивами информации.

Модуль моделирования работы ИЖДТ содержит информацию о работе и расположении железнодорожных станций на железнодорожной сети (блок № 2). Для правильного графического представления используются географические

координаты железнодорожных станций ($x_u; y_u$) и соединяющие их во взаимном расположении линии (перегоны), которые характеризуются протяженностью, типом и видом тяги на нем, а также суммарным поездопоток, интервалами поступления поездов и требуемой пропускной способностью ($E: \{\Pi_u; n_{\text{поезд}}; J_{\text{вх}}; N_{\text{пс}}^{\text{тр}}\}$).

Для проведения эксперимента загружаются базы данных [14], характеризующие железнодорожные станции: наименование, категория (тип, класс), производимая работа на ней, принципиальная схема, включающая количество путей, длину (полную и полезную) с вместимостью вагонов, а также координаты широты и долготы и т. п. ($U: \{\Phi_u; W_u; S_u (l_{\text{ст}_u}, m_{\text{пу}}^{\text{жлс}}, m_{\text{ту}}^{\text{жлс}}); A; x_u; y_u\}$), а также вводятся другие необходимые данные (блок № 3), представленные в табл. 1.

Таблица 2. Массивы исходных данных для реализации модуля имитации воздействия ЧС на ИЖДТ

Исходные данные ИМ-ЖАТ		Источники получения информации по показателям моделирования
Вид (характеристика) исходной информации	Обозначение по тексту	
Вероятность разрушения	$P_{\text{разр}}$	Рассчитывается программой согласно [11]
Прогнозируемые объемы разрушений	$V_{\text{разр}}$	
Прогнозируемые сценарии ЧС	$P_{\text{сцен}}$	Определяется (справочное)
Зоны воздействия противника на ИЖДТ	$ЗВ_n$	$\left\{ \begin{matrix} (x_1^n; y_1^n), (x_2^n; y_2^n), \\ (x_3^n; y_3^n), (x_4^n; y_4^n) \end{matrix} \right\}$ Метод Монте-Карло

Географические объекты, коими являются железнодорожные станции, определяются сферическими координатами (долгота, широта и высота над уровнем моря), а в ИМ-ЖАТ используется декартова система координат. Поэтому необходимо сферические координаты $(\theta; \varphi; \rho)$ преобразовать к декартовой системе координат $(x; y; z)$ по формулам:

$$\begin{cases} x = \rho \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ y = \rho \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ z = \rho \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, в декартовой системе координат, используя координаты широты и долготы, строится и выводится на экран выбранная железнодорожная сеть.

По умолчанию до воздействия внешних факторов, все железнодорожные станции выполняют полезные (нормальные) функции в полном объеме (блок № 5) и определяются:

$$\Phi = \sum_{i=1}^s \Phi_i + \sum_{v=1}^{\vartheta} \Phi'_v, \quad (8)$$

где Φ_i — i -я основная функция s -го типа железнодорожной станции;

Φ'_v — v -я дополнительная функция ϑ -го типа железнодорожной станции при воздействии ЧС, например в военное время или при проведении специальной военной операции.

Имитация воздействия внешних факторов на ИЖДТ (блок № 7) построена на методике прогнозирования воздействия ЧС [15].

Поскольку в настоящее время невозможно точно определить, в каком месте возникнет ЧС, в связи с этим в ИМ-ЖАТ будем использовать

«зоны воздействия» [16, 17] — это территория (район), в границах которой расположены объекты ИЖДТ и прогнозируется воздействие ЧС. «Зоны воздействия» определяются для конкретной железной дороги. Для каждой n -й зоны, которая включает как минимум 3–4 железнодорожных узла и несколько сортировочных и участковых станций (вариант представлен на рис. 3, а), задаются вершины координат $(x_1^n; y_1^n), (x_2^n; y_2^n), (x_3^n; y_3^n), (x_4^n; y_4^n)$. Моделирование воздействия ЧС в ИМ-ЖАТ (рис. 3, б) производится при помощи генератора случайных величин на основе метода Монте-Карло (блок № 6 и 7). Данные для модуля имитации воздействия ЧС по ИЖДТ представлены в табл. 2.

На заключительном этапе моделирования воздействия ЧС анализируются разрушенные и уцелевшие железнодорожные станции и выводятся результаты разрушений $V_{\text{разр}} = \{S_u; I_{\text{ст}_u}; m_{\text{п}_u}^{\text{ждс}}; m_{\text{т}_u}^{\text{ждс}}\}$ (типология, количество и характеристика разрушенных железнодорожных станций). При необходимости проводится корректировка данных по объемам разрушений (блок № 9).

Таким образом, основными обобщенными параметрами модуля имитации воздействия ЧС являются вероятность и объемы разрушения $(P_{\text{разр}}, V_{\text{разр}})$.

Модуль имитации восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях выполняет расчет необходимого количества сил и средств вариантов восстановления станционных устройств ЖАТ (блок № 10 и 11), используя методики, разработанные авторами [5, 6, 11, 18], в которых решен вопрос расчета необходимого минимального напольного оборудования, необходимого для скорейшего открытия прерванного движения поездов на

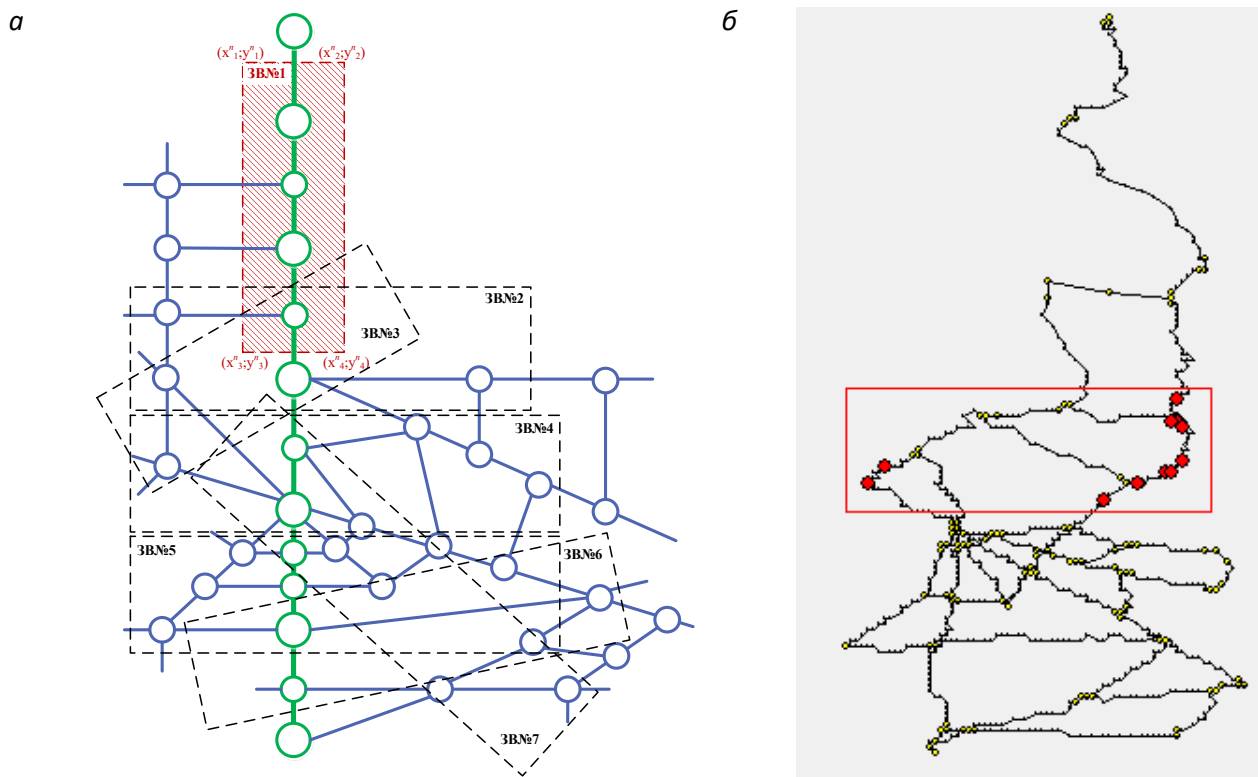


Рис. 3. Воздействие ЧС на ИЖДТ (вариант)

восстанавливаемой железнодорожной станции [19]. Необходимые данные для этого модуля представлены в табл. 3.

Для оценки эффективности выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов рассчитывается согласно (2) показатель обеспечения непрерывности работы разрушенных железнодорожных станций ($k_{\text{жлс}}^p$) (блок № 13), который сравнивается с нормативным показателем ($k_{\text{жлс}}^{\text{отгф}}$) и при условии $k_{\text{жлс}}^p \geq k_{\text{жлс}}^{\text{отгф}}$ (блок № 14) выводит результаты имитационного моделирования для статистической обработки (блок № 15).

Таким образом осуществляется работа всей ИМ-ЖАТ, в результате чего достигается повышение оперативности и эффективности восстановительных мероприятий ИЖДТ.

Заключение

В работе сделан аналитический обзор исследований в области восстановления прерванного движения поездов. Проведен анализ способов восстановления, на основе которого определена функциональная цель ИМ-ЖАТ, заключающаяся на данном этапе в определении необходимого количества СНВК-ЖАТ для выполнения

заданного объема перевозок. Также определен показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции, который выражает связь между компонентами эффективности структуры объекта ИЖДТ и в то же время является оценочным показателем эффективности выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов.

Основной целью работы являлось использование имитационной модели работы инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом применения СНВК-ЖАТ, которая позволяет:

- проводить эксперименты по определению альтернативного способа восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях;
- оценить эффективность выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях;
- рассчитать необходимое количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов с учетом применения СНВК-ЖАТ;
- рационально распределять ограниченный ресурс времени, материалов, человеческих сил, выделяемых на восстановление прерванного движения в различных условиях обстановки.

Таблица 3. **Массивы исходных данных для реализации модуля имитации восстановления прерванного движения поездов**

Исходные данные ИМ-ЖАТ		Источники получения информации по показателям моделирования
Вид (характеристика) исходной информации	Обозначение по тексту	
Количество требуемых комплектов СНВК-ЖАТ	$R_{\text{СНВК}} = [r_j]$	методики [5, 6, 11, 18]
Восстанавливаемое количество станционных путей	$m_{\text{п}}^{\text{ВЖДС}}$	БД ИЖДТ [14]
Восстанавливаемое количество путей специального назначения	$m_{\text{т}}^{\text{ВЖДС}}$	
Длина восстанавливаемой железнодорожной станции	$l_{\text{ст}}$	
Количество стрелочных электроприводов	$n_{\text{сэп}}$	рассчитывается программой согласно [11]
Количество рельсовых цепей	$n_{\text{рц}}$	
Количество устройств для системы счетчиков осей	$n_{\text{со}}$	
Количество мачтовых светофоров	$n_{\text{смч}}$	
Количество карликовых светофоров	$n_{\text{ск}}$	
Требуемые затраты труда	$T_{\text{р}}^{\text{т}}$	
Норма времени на выполнение объема работ	$H_{\text{вр}}$	
Период от воздействия ЧС до завершения восстановительных работ	$T_{\text{восст}}$	$T_{\text{восст}} = t_{\text{восст}}^{\text{I}} + t_{\text{восст}}^{\text{II}}$
Продолжительность перерыва в работе (времени восстановления открытия сквозного движения)	$T_{\text{пер}} = t_{\text{восст}}^{\text{I}}$	$T_{\text{пер}} = \frac{T_{\text{р}} P_{\text{об}}^{\text{I}} \cdot k_{\text{усл}}^1 \cdot k_{\text{усл}}^2}{\Psi_{\text{лс}} + \Psi_{\text{м}} \cdot k_{\text{снтр}}} + t_{\text{под}}$
Продолжительность восстановительных работ второго этапа	$t_{\text{восст}}^{\text{II}}$	$t_{\text{восст}}^{\text{II}} = \frac{T_{\text{р}} P_{\text{об}}^{\text{II}} \cdot k_{\text{усл}}^1 \cdot k_{\text{усл}}^2}{\Psi_{\text{лс}} + \Psi_{\text{м}} \cdot k_{\text{снтр}}} + t_{\text{нал}} + t_{\text{зав}}$
Продолжительность выполнения каждой работы технологического процесса	$t_{\text{раб}}$	$t_{\text{раб}} = \frac{T_{\text{р}}^{\text{т}}}{\Psi_{\text{к}} \cdot c_{\text{сут}}}$
Показатель обеспечения безопасности движения поездов на восстанавливаемой железнодорожной станции	$k_{\text{бдп}}$	$k_{\text{бдп}} = \left(\frac{t_{\text{восст}}^{\text{II}} - t_{\text{нал}}}{t_{\text{восст}}^{\text{II}}} \right) \cdot k_{\text{вждс}}^{\text{пут}}$
Показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции	$k_{\text{ждс}}$	рассчитывается согласно выражению (2)
Нормированный коэффициент надежности	$\alpha_{\text{н}}$	$\alpha_{\text{н}} = 0,83 \dots 0,96$
Общее число факторов, способных перевести ИЖДТ в <i>f</i> -е опасные состояния при его поражении	N_f	вводится (устанавливается) пользователем
Интенсивность опасных отказов за расчетное время $T_{\text{р}}$	$\lambda_{\text{оп}}(T_{\text{р}})$	

¹ БД ТП — База данных технологических процессов.

ИМ-ЖАТ должна стать фрагментом автоматизированной информационной системы для управления процессом восстановления железных дорог при воздействии ЧС, а также составной частью концепции восстановления прерванного движения поездов в мирное и военное время.

Такие исследования на математических моделях позволяют определять оптимальные

способы восстановления прерванного движения поездов, что позволит в дальнейшем повысить эффективность средств и способов организации и ведения восстановительных работ.

Только всестороннее и комплексное изучение этой сложной научно-технической задачи позволит повысить качество выработки рациональных подходов к восстановлению железнодорожного транспорта как сложной

организационно-технической системы, а следовательно, обеспечению надежного и безопасного его функционирования, что положительным образом скажется на выполнении железнодорожным транспортом своих задач как важной стратегической отрасли нашей страны.▲

Библиографический список

1. Никитин А. Б. Транспортабельные модули электрической централизации как средство восстановления систем управления движением поездов / А. Б. Никитин, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 2. — С. 127–142.
2. ООО «ПОЛИВИД». Группа компаний. — URL: <http://polivid.ru> (дата обращения: 29.11.2016).
3. Мобильная электрическая централизация стрелок и сигналов на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК-М: Техническое описание. Т. I. Пояснительная записка. — СПб.: ПГУПС, 2002. — 23 с.
4. Смагин Ю. С. Мобильный комплекс микропроцессорной системы управления стрелками и светофорами участка железной дороги / Ю. С. Смагин, О. Ю. Шатковский и др. // Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели». — М.: ФИПС, 2017. — № 17. — Патент на изобретение № 2622522 от 16 июня 2017 г.
5. Яшин М. Г. Расчет количества напольных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики для восстановления регулирования движения поездов на станции / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 2. — С. 198–207.
6. Яшин М. Г. Методика обоснования оптимального решения при расчете и выборе станционного напольного восстановительного комплекта / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев, А. С. Шарлай // Транспорт Урала. — 2016. — № 3(50). — С. 48–53. — DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-48-53.
7. Кочнев Д. В. Обоснование показателя системы обеспечения безопасного регулирования движения поездов на железнодорожной станции / Д. В. Кочнев, Р. А. Пантелеев // Специальная техника и технологии транспорта. — 2020. — № 5(43). — С. 101–110.
8. Савинов К. Н. Функциональный анализ технико-эксплуатационных показателей работы железнодорожной станции / К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2019: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12–13 ноября 2019 года / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук. — Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2019. — С. 394–399.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 10-е изд. / Е. С. Вентцель. — М.: Высшая школа, 2006. — 575 с.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — 12-е изд., перераб. — М.: Высш. образование, 2005. — 479 с.
11. Пантелеев Р. А. Методика расчета потребного количества сил и средств вариантов восстановления станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Р. А. Пантелеев // Научно-технический сборник. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2016. — Вып. 31. — Ч. 1. — С. 26–38.
12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620594 Российская Федерация. База данных технологических процессов эксплуатации и восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: № 2019620505: заявл. 04.04.2019; опубл. 15.04.2019 / Р. А. Пантелеев, К. Н. Савинов, В. В. Трубицин и др.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616262 Российская Федерация. Модель выбора рациональных конструктивно-технологических решений при восстановлении станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при воздействии чрезвычайной ситуации: № 2019614831: заявл. 30.04.2019; опубл. 21.05.2019 / Р. А. Пантелеев, М. Г. Яшин, А. М. Перепеченов и др.
14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620651 Российская Федерация. База данных системы поддержки принятия решения при восстановлении станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики северо-западного железнодорожного направления: № 2019620522: заявл. 08.04.2019; опубл. 19.04.2019 / Р. А. Пантелеев, М. Г. Яшин, А. М. Перепеченов и др.
15. Разрушение железнодорожных объектов. Характер разрушений станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / К. Н. Савинов, Р. А. Пантелеев. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2019. — 104 с.
16. Савинов К. Н. Моделирование работы направления с учетом применения станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики / К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2021: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. — Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2021. — С. 156–161.
17. Пантелеев Р. А. Прогнозирование воздействия вероятного противника по объектам инфраструктуры железнодорожного направления / Р. А. Пантелеев, А. М. Перепеченов // Материалы межотраслевой конференции «Проблемы применения Железнодорожных войск и ОАО «РЖД» при техническом прикрытии и восстановлении железных дорог» 14 февраля 2019 года. — СПб.: НИИ (ВСИ МТО) ВА МТО, 2019. — С. 138–142.
18. Пантелеев Р. А. Методика расчета состава станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики / Р. А. Пантелеев // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Проблемы организации материально-технического обеспечения военной безопасности (труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции). — СПб.: ВА МТО, 2016. — Т. 7. — Ч. 2 — С. 232–243.
19. Бабошин В. А. Автоматизация планирования восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях с применением аддитивного производства / В. А. Бабошин, Р. А. Пантелеев, П. Н. Фомин // Автоматизация процессов управления. — 2021. — № 4(66). — С. 53–65. — DOI: 10.35752/1991-2927-2021-4-66-53-65.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 354–366
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-354-366

Modelling of Railway Transport Infrastructure Operation in Emergency Situations Given Application of Inventory Kits

Information about authors

Yashin M. G., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: maikl771@rambler.ru

Panteleev R. A., PhD in Engineering, Senior Lecturer¹. E-mail: pantel98@mail.ru

Kushpil I. V., PhD in Engineering, Senior Lecturer². E-mail: i_kushpil@mail.ru

Fomin N. N., Cadet¹. E-mail: fomin.nik04@gmail.com

¹Military Institute (of Railway Troops and Military Communications). Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev, Department of "Restoration of Automation Devices, Remote Control and Communication on Railways", Saint Petersburg

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of «Automation and Remote Control on Railways», Saint Petersburg

Abstract: When break in railway train traffic appears because of the impact of emergencies of natural, technogenic and biological-social character, it's necessary to restore the sooner the better normal, stable and safe work of railway transport in a whole. Together, if to consider railway transport as a system, the changes proceeding in this system in the case of this kind impact, 're possible only above its mathematical model which is built for to describe railway transport infrastructure functioning in conditions of the impact of emergencies and 's realized in simulation model. For to raise recovery activity operativity and effectiveness it's proposed the application of stationary floor recovery kits which include floor devices of railway automatics and remote control. The article describes the simulation model of railway transport infrastructure given stationary floor recovery kit of railway automatics and remote control, the model allows to pursue experiments, to calculate required amount of forces and means for to recover train interrupted traffic on railway stations as well as to assess the effectiveness of being implemented recovery works in emergency impact conditions.

Keywords: railway transport infrastructure; railway station; interrupted traffic recovery; recovery approaches; railway station work continuity; station recovery kit of railway automatics and remote control.

References

1. Nikitin, A. B. Transportabel'nye moduli jelektricheskoy centralizacii kak sredstvo vosstanovleniya sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Transportable modules of electrical interlocking as a means of restoring train traffic control systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic on transport]. 2015, vol. 1, I. 2, pp. 127–142. (In Russian)
2. 000 «POLIVID». *Gruppa kompanij. – Oficial'nyj sajt* [LLC "POLIVID". Company group. – Official site]. Available at: <http://polivid.ru> (accessed: November 29, 2016).
3. *Mobil'naja jelektricheskaja centralizacija strelok i signalov na baze mikro-JeVM i programmiruemyh kontrollerov JeC-MPK-M: Tehnicheskoe opisanie. Tom I. Pojasnitel'naja zapiska* [Mobile electrical centralization of arrows and signals based on microcomputers and programmable controllers ETs-MPK-M: Technical description. Volume I. Explanatory note]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2002. 23 p. (In Russian)
4. Mobil'nyj kompleks mikroprocessornoj sistemy upravleniya strelkami i svetoforami uchastka zheleznoj dorogi [Mobile complex of the microprocessor control system for arrows and traffic lights of the railway section]. *Oficial'nyj bjulleten' «Izobretenija. Poleznye modeli»* [Official Bulletin "Inventions. Utility Models"]. Moscow: FIPS Publ., 2017. I. 17, (Patent na izobretenie № 2622522 ot 16 ijunja 2017 g.). (In Russian)
5. Jashin M. G. Raschet kolichestva napol'nyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki dlja vosstanovlenija regulirovaniya dvizhenija poezdov na stancii [Calculation of the number of outdoor devices for railway automation and telemechanics for restoring the regulation of train traffic at the station]. *Avtomatika na transporte* [Automatic on transport]. 2016, vol. 2, I. 2, pp. 198–207. (In Russian)
6. Jashin M. G. Metodika obosnovanija optimal'nogo reshenija pri raschete i vybore stacionnogo napol'nogo vosstanovitel'nogo komplekta [Methodology for substantiating the optimal solution in the calculation and selection of a station floor restoration kit]. *Transport Urala* [Transportation of the Urals]. 2016, I. 3(50), pp. 48–53. DOI 10.20291/1815-9400-2016-3-48-53. (In Russian)
7. Kochnev D. V. Obosnovanie pokazatelya sistemy obespechenija bezopasnogo regulirovaniya dvizhenija poezdov na zheleznodorozhnoj stancii [Substantiation of the indicator of the system for ensuring the safe regulation of train traffic at the railway station]. *Special'naja tehnika i tehnologii transporta* [Special Technique and Transport Technologies]. 2020, I. 5(43), pp. 101–110. (In Russian)
8. Savinov K. N. Funkcional'nyj analiz tehniko-jekspluatacionnyh pokazatelej raboty zheleznodorozhnoj stancii [Functional analysis of technical and operational indicators of the railway station]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2019: Materialy mezhdunarodnoj-nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 12–13 nojabrja 2019 goda. FGBUN Institut problem transporta im. N. S. Solomenko Rossijskoj akademii nauk, 2019 Kollektiv avtorov, 2019* [Transport of Russia: problems and prospects - 2019: Materials of the international scientific-practical conference, St. Petersburg, November 12–13, 2019. FGBUN Institute of Transport Problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 2019 Team of authors, 2019]. Sankt-Peterburg: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2019, pp. 394–399. (In Russian)
9. Ventcel' E. S. *Teorija verojatnostej* [Theory of Probability]. Moscow: Vysshaja shkola Publ., 2006. 575 p. (In Russian)
10. Gmurman V. E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics: Proc. allowance for universities]. Moscow: Vyssh. Obrazovanie Publ., 2005. 479 p. (In Russian)
11. Panteleev R. A. Metodika raschjota potrebnogo kolichestva sil i sredstv variantov vosstanovlenija stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Methodology for calculating the required number of forces and means of options for restoring station devices of railway automation and telemechanics]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik* [Scientific and technical collection]. Petergof: VI (ZhVd i VOSO) Publ., 2016, pp. 26–38. (In Russian)
12. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2019620594 Rossijskaja Federacija. Baza dannyh tehnologicheskikh processov jekspluatacii i vosstanovlenija ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki : № 2019620505 : zajavl. 04.04.2019 : opubl. 15.04.2019* [Certificate of state registration of the database No. 2019620594 Russian Federation. Database of technological processes for the operation and restoration of railway automation and remote control devices: No. 2019620505: Appl. 04/04/2019 : publ. April 15, 2019]. (In Russian)
13. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2019616262 Rossijskaja Federacija. Model' vybora racional'nyh konstruktivno-tehnologicheskikh reshenij pri vosstanovlenii stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki pri vozdejstvii chrezvychajnoj situacii : № 2019614831 : zajavl. 30.04.2019 : opubl. 21.05.2019* [Certificate of state registration of the computer program No. 2019616262 Russian Federation. Model for the selection of rational design and technological solutions for the restoration of station devices for railway automation and telemechanics under the influence of an emergency: No. 2019614831: Appl. 04/30/2019 : publ. May 21, 2019]. (In Russian)
14. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2019620651 Rossijskaja Federacija. Baza dannyh sistemy podderzhki prinjatija reshenija pri vosstanovlenii stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki severo-zapadno-gozheleznodorozhno napravlenija : № 2019620522 : zajavl. 08.04.2019 : opubl.*

- 19.04.2019 [Certificate of state registration of the database No. 2019620651 Russian Federation. Database of the decision support system for the restoration of station devices for railway automation and telemechanics of the northwestern railway direction: No. 2019620522: Appl. 04/08/2019 : publ. April 19, 2019]. (In Russian)
15. *Razrushenie zheleznodorozhnyh ob#ektov. Harakter razrushenij stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki* [Destruction of railway facilities. The nature of the destruction of station devices for railway automation and telemechanics] Petergof : VI (ZhDV i VOSO) Publ., 2019. 104 p. (In Russian)
 16. Savinov K. N. Modelirovanie raboty napravlenija s uchjotom primenenija stacionnogo napol'nogo vosstanovitel'nogo komplekta zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Modeling of the direction work taking into account the use of a station floor recovery set of railway automation and telemechanics]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2021 : Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 09–10 nojabrja 2021 goda* [Transport of Russia: problems and prospects - 2021 : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09–10, 2021]. Sankt-Peterburg: Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN Publ., 2021, pp. 156–161. (In Russian)
 17. Panteleev R. A. Prognozirovanie vozdeystvija verojatnogo protivnika po ob#ektam infrastruktury zheleznodorozhnogo napravlenija [Forecasting the impact of a potential enemy on railway infrastructure facilities]. *Materialy mezhotraslevoj konferencii «Problemy primenenija Zheleznodorozhnyh vojsk i OAO «RZhD» pri tehničeskom prikrytii i vosstanovlenii zheleznih dorog» 14 fevralja 2019 goda* [Materials of the intersectoral conference “Problems of the use of the Railway Troops and Russian Railways JSC in technical cover and restoration of railways” February 14, 2019. St. Petersburg. : Research Institute (VSI MTO) VA MTO, 2019]. St Petersburg: NII (VSI MTO) VA MTO Publ., 2019, pp. 138–142. (In Russian)
 18. Panteleev R. A. Metodika raschjota sostava stacionnogo napol'nogo vosstanovitel'nogo komplekta zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Methodology for calculating the composition of the station floor restoration set of railway automation and telemechanics]. *Aktual'nye problemy zashhity i bezopasnosti: Problemy organizacii material'no-tehničeskogo obespečenija voennoj bezopasnosti (trudy XVIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii)* [Actual problems of protection and security: Problems of organizing the logistics of military security (Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference)]. St. Petersburg: VA MTO Publ., 2016, pp. 232–243. (In Russian)
 19. Baboshin V. A. Avtomatizacija planirovanija vosstanovlenija prevannogo dvizhenija poezdov na zheleznodorozhnyh stancijah s primeneniem additivnogo proizvodstva [Automation of planning for the restoration of interrupted train traffic at railway stations using additive manufacturing]. *Avtomatizacija processov upravlenija* [Automation of control processes]. 2021, I. 4(66), pp. 53–65. DOI 10.35752/1991-2927-2021-4-66-53-65. (In Russian)