

На правах рукописи



НЕЧАЙ Татьяна Алексеевна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ПЛАНИРОВАНИЯ МАНЕВРОВОЙ РАБОТЫ НА ПРОМЫШЛЕННОМ
ТРАНСПОРТЕ**

Специальность 05.13.17 – теоретические основы информатики

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный технологический университет» на кафедре «Информационные технологии и системы».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Роганов Владимир Робертович

Официальные оппоненты: **Колоденкова Анна Евгеньевна**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
заведующий кафедрой «Информационные
технологии»;
Тюрин Михаил Владимирович,
кандидат технических наук,
АО «Научно-исследовательский институт
физических измерений»,
старший научный сотрудник конструктор-
ского бюро №1

Ведущая организация: АО «Научно-производственное предпри-
ятие «Рубин», г.Пенза.

Защита состоится 28 февраля 2020 г., в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» и на сайте www.penzgtu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие современного промышленного производства в условиях цифровой экономики предполагает использование территориально распределённых производственных структур, объединённых единой логистической сетью. В качестве элементов такой структуры часто выступают производства, спроектированные и созданные в 20–30 годах прошлого века, логистическая структура которых соответствует представлениям того времени. Уменьшение рисков, связанных с логистикой в условиях непрерывно усложняющейся территориально-производственной структуры, требует новых методических и алгоритмических решений в области логистической инфраструктуры. Важнейшим элементом современной логистики является информационно-структурная модель формирования минимального по затратам времени или топлива плана маневровых перемещений подвижного состава в сетях необщего пользования, физическая структура которых специфична и изменяется от предприятия к предприятию. В данной работе поставлена и решена задача создания специализированных информационно-структурных моделей и алгоритмов поиска оптимизированных маршрутов движения в соответствии с развитием путевой инфраструктуры на промышленном железнодорожном транспорте (ПЖДТ).

Анализ процессов принятия решений по основным операциям с вагонами обнаруживает их сложность и многокритериальность, а также наличие жестких временных ограничений при оперативном управлении перемещением вагонов, их выгрузкой и погрузкой в реальном времени. Все это обуславливает необходимость разработки новых моделей информационных процессов и совершенствования методов формирования оптимального плана маневровых перемещений состава в сети необщего пользования. При этом должна учитываться интерактивность процессов приема, передачи и обработки информации с ориентацией на использование программно-технических систем (ПТС), а также адекватные информационно-структурные модели логистической инфраструктуры ПЖДТ.

Исследованиям по развитию технологий диспетчерского управления железнодорожной транспортной системой на промышленных предприятиях посвящены труды многих авторов, среди которых следует выделить Афонина С.А., Долгий И.Д., Варгунина М.В., Лаврухина О.В., Гренкевич О.О., Воронько В.А., Балабина В.Н. и др. Хотя им удалось решить частные задачи

улучшения маневровой работы на транспорте, общего подхода к определению оптимальных параметров маневровых операций до настоящего момента не выработано. Не найдено универсального метода решения задач информационного обеспечения ПТС для планирования, нормирования и расчета времени маневровой работы, учитывающего всю совокупность сопряженных с этой работой факторов. Известные методики аналитической обработки информации, нормативные документы для информационного обеспечения ПТС по маневровой работе на магистральном транспорте ввиду особенностей промышленного транспорта трудно применимы и не эффективны в приложении к ПЖДТ. К особым условиям маневровой работы ПЖДТ можно отнести наличие нецентрализованных стрелочных переводов (СП) и путей с малыми радиусами в кривых, наличие неисправных путей, частые прицепки и отцепки вагонов, подача их на пути погрузки или выгрузки. В этих условиях практически неприменимы алгоритмы, ранее разработанные для магистрального транспорта.

Поэтому создание моделей и алгоритмов для специализированных информационных систем планирования маневровой работой на промышленном железнодорожном транспорте представляет собой актуальную научную задачу.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка математических моделей и алгоритмов взаимодействия информационных процессов и структур для планирования маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте.

Основные задачи исследования.

1. Провести сравнительный анализ информационно-структурных моделей, алгоритмов и технических средств планирования и нормирования маневровой работы промышленного железнодорожного транспорта, выявить целесообразные направления их совершенствования.

2. Разработать информационно-структурные модели для специализированной вычислительной системы планирования и нормирования маневровой работы и алгоритмы определения оптимальных маршрутов движения на промышленном железнодорожном транспорте.

3. Создать специализированную вычислительную систему планирования и нормирования маневровой работы с использованием нейросетевых алгоритмов и разработать методику адаптированных тяговых расчётов как

информационной технологии многофакторного прогнозирования времени маневровых операций.

4. Разработать технические решения по реализации специализированной вычислительной системы планирования и нормирования маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте в виде программного модуля, оптимизирующего процесс сбора и обработки информации.

Объектом исследования являются методы организации информационных процессов и структур, обеспечивающих технологические операции при передвижении подвижного состава на промышленном железнодорожном транспорте.

Предмет исследования – математические и объектно-ориентированные модели информационных процессов и структур для оперативного управления маневровой работой подвижного состава.

Соответствие паспорту научной специальности. Тема и содержание диссертационного исследования соответствуют Паспорту специальности 05.13.17 в части пунктов:

1 – Исследование, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей;

2 – Исследование информационных структур, разработка и анализ моделей информационных процессов и структур;

5 – Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечениях, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений;

12 – Разработка математических, логических, семиотических и лингвистических моделей и методов взаимодействия информационных процессов, в том числе на базе специализированных вычислительных систем.

Методы исследования основаны на теории моделирования, теории транспортных процессов и систем, графоаналитических методах, теориях множеств и нейронных сетей, математическом программировании, теории систем и системного анализа, теории алгоритмов и логико-алгебраическом моделировании.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Создана информационно-структурная модель специализированной вычислительной системы и алгоритм для планирования и нормирования маневровой работы, отличающаяся введением дополнительных параметров: тяговых характеристик локомотива, массы и структуры состава, руководящих уклонов, вспомогательных операций по ручной подготовке маршрута следования, ограничений движения по участкам, что позволяет построить оптимальный маршрут на основе информации о временных и топливных резервах.

2. Разработана оригинальная методика сбора и обработки информации для планирования маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте, отличающаяся использованием новой информационно-структурной модели и модернизированного алгоритма тяговых расчётов, учитывающих зависимость силы тяги локомотива от позиции контроллера машиниста и тип маневрового полурейса, что позволяет оценить топливные и временные затраты и выбрать оптимальный вариант движения состава.

3. Разработана новая структура специализированной вычислительной системы, в которую включена нейросеть в виде многослойного персептрона, а в качестве обучающей выборки использованы результаты тяговых расчетов, что дает возможность увеличить быстродействие вычислительной системы при оценке длительности полурейса маневрового состава.

Практическое значение полученных результатов заключается в следующем.

1. Разработан программный модуль специализированной вычислительной системы, отличающийся алгоритмом поиска безостановочных маршрутов движения по графу станции, что позволяет строить маршрут, экономящий либо время движения состава, либо расход топлива при наличии временного резерва.

2. Разработан программный модуль специализированной вычислительной системы расчёта времени маневрового полурейса тяговыми расчетам, отличающийся адаптированностью к условиям промышленного железнодорожного транспорта, позволяющий получить точные временные и топливные затраты при известной длине маршрута движения.

3. В структуру специализированной вычислительной системы включен блок нейросети, отличающийся обучением на основании выборки, по-

лученной с помощью модифицированной методики тяговых расчетов, позволяющий сократить время обработки массива данных при вычислениях времени в условиях крупных промышленных предприятий.

Полученные результаты носят прикладной характер и могут использоваться при создании специализированных информационно-вычислительных систем для нормирования и планирования операций по перестроению состава методом осаживания, использоваться руководителями для контроля своих подчиненных. Использование результатов исследования позволяет повысить продуктивность систем при оперативном планировании за счет упрощенной процедуры расчета времени перестроения состава, что весьма актуально в комбинаторных задачах и задачах, связанных с большим числом итераций.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Информационно-структурная модель специализированной вычислительной системы формирования минимального по времени либо по топливу плана маневровых перемещений состава в сети необщего пользования.
2. Алгоритм многоуровневого отбора маршрутов движения по графу путевого развития с использованием актуальной информации о состоянии структуры сети промышленного железнодорожного транспорта.
3. Методика сбора и обработки информации для информационно-структурной модели системы планирования и нормирования маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте, учитывающая переменную силу тяги локомотива в зависимости от позиции контроллера машиниста, а также типа маневрового полурейса.
4. Структура специализированной вычислительной системы, включающая нейросеть в виде многослойного персептрона, обучаемая по результатам тяговых расчетов с целью многофакторного прогнозирования времени полурейса.

Реализация и внедрение. Результаты диссертационной работы использованы в практической деятельности ОАО НПП «Кристалл», Ростовском-на-Дону ЭРЗ – филиала АО «Желдорреммаш», ООО «Донбасс-Луга», ЗАО «Внешторгсервис» – филиала №12 Алчевского металлургического комбината и ПП «Краснодонпогрузтранс» в виде программных модулей ввода и обработки информации для АРМ диспетчера промышленного транспорта «Транспорт», «Транспорт 08.М.У.» и «Маневровые маршруты» (свидетельство о государственной регистрации авторского права на произ-

ведение № 28521 от 23.04.2009, № 28189 от 31.03.2009 и № 63479 от 11.01.2016 соответственно), о чем имеются акты внедрения.

Результаты диссертации использованы при выполнении базовой части государственного задания высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности №2.6581.2017/8.9 «Модели и алгоритмы идентификации технического состояния сложных микросистем с использованием данных об изменениях параметров гетерогенных микроструктур».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрения на: I Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы глобализации и проблемы устойчивого развития экономики» (г. Луганск, Украина, 2009); Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием «Модернизация процессов перевозок, систем автоматизации и телекоммуникаций на транспорте» (г. Хабаровск, 2010); Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования» (г. Хабаровск, 2012); IV Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (г. Париж, Франция, 2013); VII Всеукраинской научно-практической конференции «Современные тенденции развития информационных технологий в науке, образовании и экономике» (г. Луганск, Украина, 2013); 16-й Международной научно-технической конференции «Моделирование. Теория, методы и средства» (г. Новочеркасск, 2016); Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» (г. Владивосток, 2016); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований» (г. Пенза, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 25 работ, в том числе 5 статей в журналах из Перечня ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 4 научных статьи в профессиональных изданиях, утвержденных ВАК Украины. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ в Государственной службе интеллектуальной собственности Украины. Выпущена в соавторстве 1 монография.

Личный вклад автора. Все результаты исследования, положенные в основу диссертации, получены автором самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, автором предложена информационно-структурная модель ввода и обработки информации для планирования маневровой работы, разработаны алгоритмы тяговых расчетов и многоуровневого отбора оптимального маршрута следования по графу путевого развития, предложено включение нейросети в структуру специализированной вычислительной системы, обоснована её архитектура, осуществлено внедрение разработанных моделей и алгоритмов в программные модули планирования маневровой работы.

Научные подходы и технические решения автора сформировались в соответствии с приоритетными направлениями развития железнодорожной отрасли, определенными в Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства от 17 июня 2008 года №877-р), Стратегии развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года (утверждена распоряжением Правительства от 1 ноября 2013 г. № 2036-р); на базе исследований в рамках проекта «Разработка теории и усовершенствование методов организации движения и обработки материальных и транспортных потоков на принципах логистики» (№ государственной регистрации ДН-0108U000162), выполненных в Восточно-украинском национальном университете им. В. Даля.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и 8 приложений. Текст изложен на 150 страницах, содержит 56 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определены объект, предмет, основные проблемы и методы исследования. Сформулированы цель и задачи научной работы и очерчены основные положения, теоретическое и практическое значения диссертационного исследования.

В первом разделе рассмотрены общие вопросы современного состояния и перспективы развития информатизации и планирования транспортных процессов на промышленных предприятиях. Очерчены перспективы развития специализированных информационно-вычислительных систем, как инструмента оперативного планирования ведения маневровой работы, способ-

ного оптимизировать информационные ресурсы в транспортных системах предприятий.

Решению теоретических и практических вопросов создания современных технологий управления на железнодорожном транспорте, формированию стратегии дальнейшего развития эксплуатационной работы посвящены труды Бронивицкого С.С., Глушкова В.М., Вернигоры Р.В., Афонина С.А, Грунтова П.С., Сотникова Е.А., Тишкина Е.М., Акулиничева В.М., Гончарова Н.Е., Казанцева В.П. и др. ученых. Улучшением оперативного планирования через построение суточных план-графиков занимались такие ученые, как Коротаев В.В., Коробйова Р.Г., Бобровский В.И. Основы теории тяги поездов были заложены учеными Петровым Н.П. и Бородиным А.П., современную теорию усиливают работы ученых: Осипова С.И., Коняева А.Н., Голубенко А.Л., Фуфрянского Н.А. и многие другие.

Большинство научных работ железнодорожной тематики посвящено вопросам ввода и обработки информации для магистрального транспорта, однако этим же вопросам на ПЖДТ уделено недостаточное внимание из-за необходимости учета большого числа плохо структурированных исходных данных, которые требуют сбора при помощи ручного труда.

Сравнительный анализ информационно-структурных моделей, алгоритмов и технических средств планирования и нормирования маневровой работы промышленного железнодорожного транспорта показал, что ввод и обработка информации для многофакторного прогнозирования маневровой работы должны основываться на аналитическом моделировании с использованием современных компьютерных технологий и возможности визуализации процесса. Это позволит убрать недостаток аналитического подхода – значительное упрощение и абстракцию системы для возможности реализации и использовать достоинства имитационного и графоаналитического моделирования: представление результатов расчетов, как описание реализации технологических операций с исследуемыми объектами в динамике времени и возможность вывода конечных результатов в стандартной и доступной конечному пользователю форме.

Проблема планирования и нормирования маневровой работы в условиях отсутствия централизации СП, что характерно для промышленных предприятий, на данный момент остается открытой. Большинство существующих методов аналитическим путем прогнозируют время с большим упрощением начальных условий, что актуализирует разработку специализиро-

ванных алгоритмов и методик, позволяющих планировать, нормировать и строить маршруты движения маневровых составов в специализированных вычислительных системах.

Во втором разделе рассмотрена информационно-структурная модель ПТС ввода и обработки информации для планирования маневровой работы на ПЖДТ. Также были определены границы системообразующих элементов и их взаимосвязи, что позволило выполнить функциональное описание элементов, получаемое из характеристик и потребностей системы в целом, и проанализировать полученную модель системы. Основные функции модели представлены в виде блоков на рис. 1.

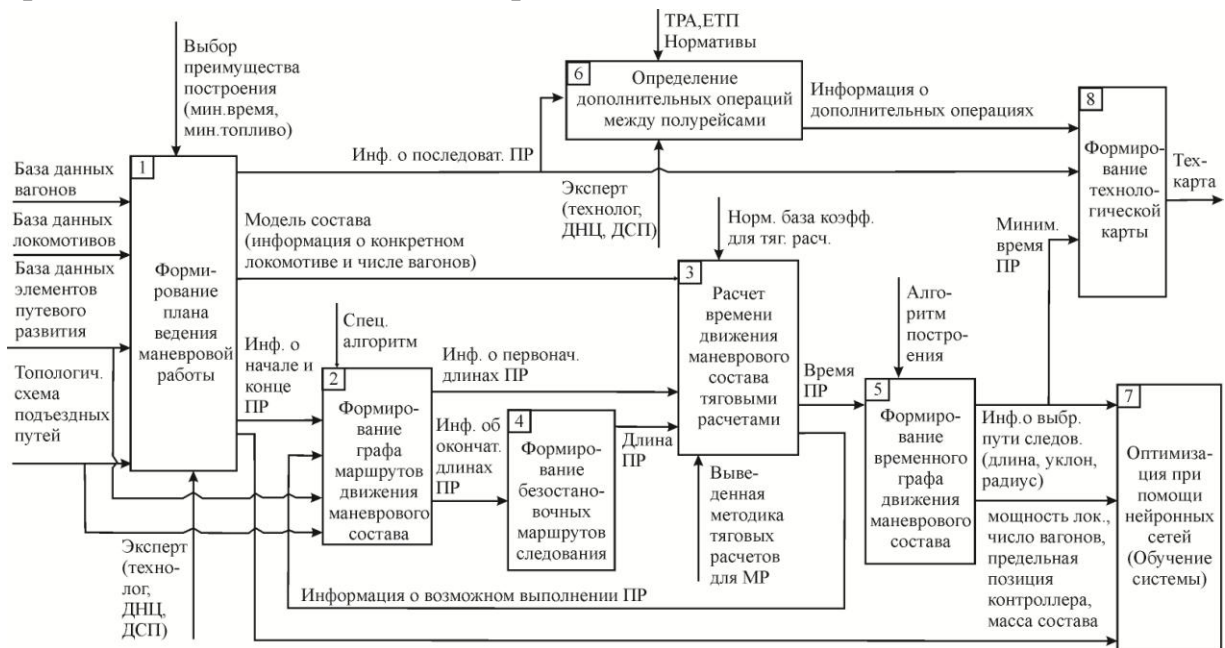


Рисунок 1 – Информационно-структурная модель ПТС ввода и обработки информации для планирования маневровой работы на ПЖДТ

Для формирования плана маневровой работы необходима информация о составе, который будет выполнять работу, месте производства маневров, а также начальная и конечная точки пути для каждого полурейса (ПР). Также нужна информация о наличии резерва времени, с учетом которой ДСП (дежурный по станции) или ДНЦ (диспетчер) задает параметры плана работы, после чего запускаются алгоритмы поиска маршрутов следования. Информация о длине и характеристике этих маршрутов передается в последующий блок для расчета времени движения. На основании расчетов, а также с учетом данных из технико-распорядительного акта (ТРА) и в соответствии с единым технологическим процессом (ЕТП), предлагается оптимизированный маршрут, состоящий из маневровых ПР. Исходя из плана ра-

боты между ПР определяются дополнительные временные затраты, которые учитываются в результирующей таблице в виде технологической карты.

Математически модель ПТС можно представить следующим образом. В общем виде время маневровой работы T_{MP} находится по формуле:

$$T_{MP} = \sum_{i=1}^n (t_{ППi} + t_{ДОi}), \quad (1)$$

где $t_{ППi}$ – время i -го маневрового ПР, мин.; $t_{ДОi}$ – время, затраченное на дополнительные операции i -го маневрового ПР, мин., определяется согласно действующим нормативам и технологическому процессу; i – число ПР, $i = 1...n, n > 0$.

Время маневрового ПР – величина переменная, расчет которой и предлагается производить с учетом конкретных условий работы. Важную роль в процессе выполнения маневровой работы имеет наличие резерва времени R_t . Исходя из проведенных исследований было принято решение проводить оптимизацию работы с учетом данного параметра:

$$\begin{cases} \text{если } R_t > 0, \text{ то } t_{ППi}^{G\min} \rightarrow \min \\ \text{если } R_t = 0, \text{ то } t_{ППi}^{\min} \rightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

При $R_t > 0$, алгоритм специализированной вычислительной системы занимается поиском варианта времени маневрового ПР $t_{ППi}^{G\min}$ с минимальным расходом топлива:

$$t_{ППi}^{G\min} (S_{Mi}; l_{cост}; l_i^{nytu}; R_{pi}; \gamma_i; r_{ППК}; t_{перекл.}^{ППК}; R_t) \rightarrow \min t_{ППi}^{G\min} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_t > 0 \\ v_i^p \leq v_i^{don} \leq v_T, i = 1...n, n > 0 \\ F_m < F_k \\ 4 \leq r_{ППК} \leq 5 \\ l_{cост} < l_i^{nytu}, i = 1...n, n > 0 \\ t_{перекл.}^{\min} < t_{перекл.}^{ППК} \\ C_M = 1 \\ \gamma_i < \gamma_i^{S_M} \end{cases}$$

где S_{Mi} – структура маневрового состава, состоящая из вагонов и локомотива для i -го отрезка пути; $l_{cост}$ – длина состава, м; l_i^{nytu} – длина i -го отрезка пути, м; R_{pi} – приведенный радиус; R_t – резерв времени, мин.; γ_i – уклон i -го отрезка пути, ‰; $\gamma_i^{S_M}$ – допустимый уклон для преодоления составом S_M на i -м

отрезке пути, ‰; $r_{ППК}$ – режим движения; $t_{перекл.}^{ППК}$ – время переключения с одной позиции контроллера машиниста на следующую, сек. (на 4-5 позиции расход топлива наименьший); $t_{перекл.}^{\min}$ – минимальное время переключения с одной позиции контроллера машиниста на следующую, 3 сек.; v_T – конструкционная скорость локомотива, км/ч; v_i^p – расчетная скорость движения на i -м участке пути, км/ч; $v_i^{\partial on}$ – допустимая скорость движения на i -м участке пути, км/ч; F_k – сила тяги длительного режима локомотива, кН; F_m – сила тяги локомотива при трогании с места, кН; C_m – маневровый локомотив, набор параметров которого представлен далее в работе.

При отсутствии резерва времени производится поиск варианта полуреяса $t_{ППi}^{\min}$ с минимальным временем:

$$t_{ППi}^{\min}(S_{Mi}; l_{cостi}; l_i^{nytu}; R_{pi}; \gamma_i; r_{ППК}; t_{перекл.}^{ППК}; R_t) \rightarrow \min t_{ППi}^{\min} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_t = 0 \\ v_i^p = v_i^{\partial on} \leq v_T, i = 1 \dots n, n > 0 \\ F_m < F_k \\ 5 < r_{ППК} \leq 8 \\ l_{cост} < l_i^{nytu}, i = 1 \dots n, n > 0 \\ t_{перекл.}^{\min} = t_{перекл.}^{ППК} \\ C_m = 1 \\ \gamma_i < \gamma_i^{S_m} \end{array} \right.$$

Ниже представлена структура элементов, участвующих в расчете времени маневрового ПР.

В информационно-вычислительной системе маневровый состав представляется в виде структуры данных:

$$S_m = \{D_{ваг}, C_m\}, \quad (5)$$

где $D_{ваг}$ – список вагонов при маневровом локомотиве, где каждый вагон имеет свой набор характеристик. $D_{ваг} = \{d_x^{ваг}\}$, где x – индекс вагона.

Характеристика вагона представляется следующим образом:

$$d_x^{ваг} = \{\delta; n_0; l_6; m_m; m_{zp}; m_{загр}\}, \quad (6)$$

где δ – тип вагона (на крупных промышленных предприятиях может присутствовать до 11 различных типов вагонов); n_0 – число осей вагона; l_6 –

длина вагона, м; m_m – масса порожнего вагона, т; m_{gp} – масса гружёного вагона, т; $m_{згр}$ – средняя загрузка вагона, т.

Каждый маневровый локомотив представлен следующим набором параметров:

$$C_m = \{a; P; v_T; v_i^p; m_n; l_m; F_k\}, \quad (7)$$

где a – осевая формула; P – мощность дизеля, кВт; m_n – служебный вес тепловоза, т; l_m – длина маневрового локомотива, м.

Длина участка движения рассчитывается с учетом длины состава и его местоположения на топографической схеме станции, с учетом положения остальных элементов схемы (СП, занятость путей). Все эти сведения учитываются при построении графа, из которого и берется первый участок безостановочного движения – длина маневрового ПР.

Схема путевого развития подъездных путей представляется в виде соединения упорядоченных множеств элементов путевого развития разных групп. При этом каждое множество разделено на подмножества объектов (СП, путей и пр.). Таким образом, любое путевое развитие может быть преобразовано в связной граф:

$$G = V^e \cup E \cup u_j^H, \quad (8)$$

где V^e – множество вершин $V^e = \{v_1^e, v_2^e, \dots, v_j^e\}$; E – множество ребер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$; u_j^H – ведомость путей.

Каждая вершина будет характеризоваться следующим набором параметров, которые в дальнейшем заносятся в базу данных: № вершины, ее математические координаты, пути, которые примыкают к данной вершине, сторонность и ее направление, под каким углом путь примыкает к СП, номера соседних вершин СП и как они примыкают в вершине:

$$v_j = \{N_j, X_j, Y_j, L1_j, L2_j, L3_j, A_j, B_j, c_j, C_j, \phi_j, N1_j, N2_j, N3_j, N4_j, N5_j, N6_j\}, \quad (9)$$

где N_j – порядковый номер вершины, которая описывается; $j = 1 \dots M$, где M – общее количество вершин графа; X_j и Y_j – координаты вершины графа относительно точки начала координат; $L1_j$ – путь, на котором расположена данная вершина; $L2_j$ и $L3_j$ – пути, которые примыкают к данной вершине; A_j и B_j – сторонность и направление вершины; c_j – нормальное положение СП; C_j – фактическое положение СП; ϕ_j – угол СП; $N1_j \dots N6_j$ – это точки примыкания соседних вершин.

А каждое ребро будет охарактеризовано следующими параметрами:

$$e_j = \{H_j, O_j, W_j, Z_j, L_j, R_{p_i}, \gamma_{i_j}\}, \quad (10)$$

где H_j – порядковый номер ребра графа; O_j, W_j – начальная и конечная точки ребра; Z_j – путь, к которому принадлежит данное ребро; L_j – длина ребра; γ_{ij} – уклон ребра. Также при построении графа учитывается характеристика ведомости путей u_j^H :

$$u_j^H = \{G_j, A_j^H, Q_j^{СП}, B_j^H, v_j, L_j^H\}, \quad (11)$$

где G_j – номер пути; A_j^H – точка начала пути; $Q_j^{СП}$ – СП, через которые проходит данный путь; B_j^H – точка конца пути; L_j^H – общая длина пути.

После выбора начальной и конечной точек движения запускается алгоритм многоуровневого отбора маршрутов, который будет преобразовывать представленный граф в ориентированный с применением безостановочных участков. Длина i -го отрезка пути таким образом будет равна:

$$l_i^{nytu} = f(v_j^s, e_j, u_j^H). \quad (12)$$

Для идентификации состояния СП относительно пути, была применена специальная методика, что было вызвано многообразием типов СП: оди-нарные, двойные, тройные, при этом симметричные и несимметричные. Кроме этого, СП может находиться в так называемом «нормальном» положении, т.е. исходном, а может быть в фактическом на момент прохождения состава через него. Поэтому были введены такие дополнительные характеристики, как сторонность и направление вершины, измеряемые в градусах, определяющие возможность съезда или заезда подвижного состава на при-мыкающий путь относительно пути, к которому принадлежит рассматри-ваемая вершина.

Идентификация состояния СП позволяет найти число возможных ва-риантов из вершины и отсесть лишние направления, а также применить в ка-честве алгоритма для нахождения кратчайшего маршрута следования алго-ритм «А*».

На первом этапе работы алгоритма исследуются вершины, смежные с начальной и находится с минимальным значением $f(x)$, после чего она рас-крывается. Далее «А*» оперирует с множеством отрезков из начальной точ-ки до всех еще не раскрытых вершин, размещенных в соответствии с при-оритетом пути, который определяется по значению $f(x)$:

$$f(x) = g(x) + h(x), \quad (13)$$

где $g(x)$ – стоимость достижения рассматриваемой вершины (x) из начальной точки; $h(x)$ – эвристическая оценка расстояния от рассматриваемой вершины пути к конечной.

Алгоритм многоуровневого отбора прекращает свою работу при нахождении минимального значения целевой вершины $f(x)$.

В третьем разделе предложен синтез методики тяговых расчетов, адаптированной под условия маневровой работы на ПЖДТ, и нейросети, обученной по выборке расчетных значений времени маневровой работы, полученной по этой методике.

Поскольку важной особенностью ПЖДТ (главным отличием от магистрального) является выполнение маневровых ПР в кривых малых радиусов, отсутствие централизации СП, малые скорости движения, то применение нормативных данных не дает достоверных результатов. Наиболее точным способом определения времени маневрового ПР, является методика тяговых расчетов. Поэтому она была выбрана инструментом для расчета времени ПР, а также для нахождения наилучшего (самого экономичного) режима движения для каждого ПР. Для этого потребовалось адаптировать ее к условиям ПЖДТ.

Общий принцип расчета заключается в следующем: на первом этапе рассчитывается длина пути разгона, время движения и расход топлива. Затем выполняется расчет тормозного пути маневрового состава. Значения при разгоне и торможении сводятся в массивы, по которым строятся графики движения. Из графиков определяется время ПР и расход топлива. Модификация методики заключается в том, что для различных позиций контролера машиниста были аппроксимированы графики уравнений силы тяги; в расчетах времени движения учитывается время при переключении между позициями, а также сами режимы движения маневрового состава.

Данная методика позволяет строить графики движения для различных режимов движения, что позволяет получить вариант оптимизированный по времени либо топливу.

На последнем этапе для формирования графиков движения маневрового состава из предыдущих блоков передаются значения расхода топлива на участках и их длина. При этом в зависимости от интервалов скоростей движения $v_{0...n}$ и заданной длины ПР происходит построение графиков движения. С помощью алгоритма график либо достраивается, либо пересчитывает параметры, если кривые разгона и торможения пересекаются. На выхо-

де получаем графики по минимальному времени либо по минимальному топливу.

Схема декомпозиции тяговых расчетов представлена на рис.2.

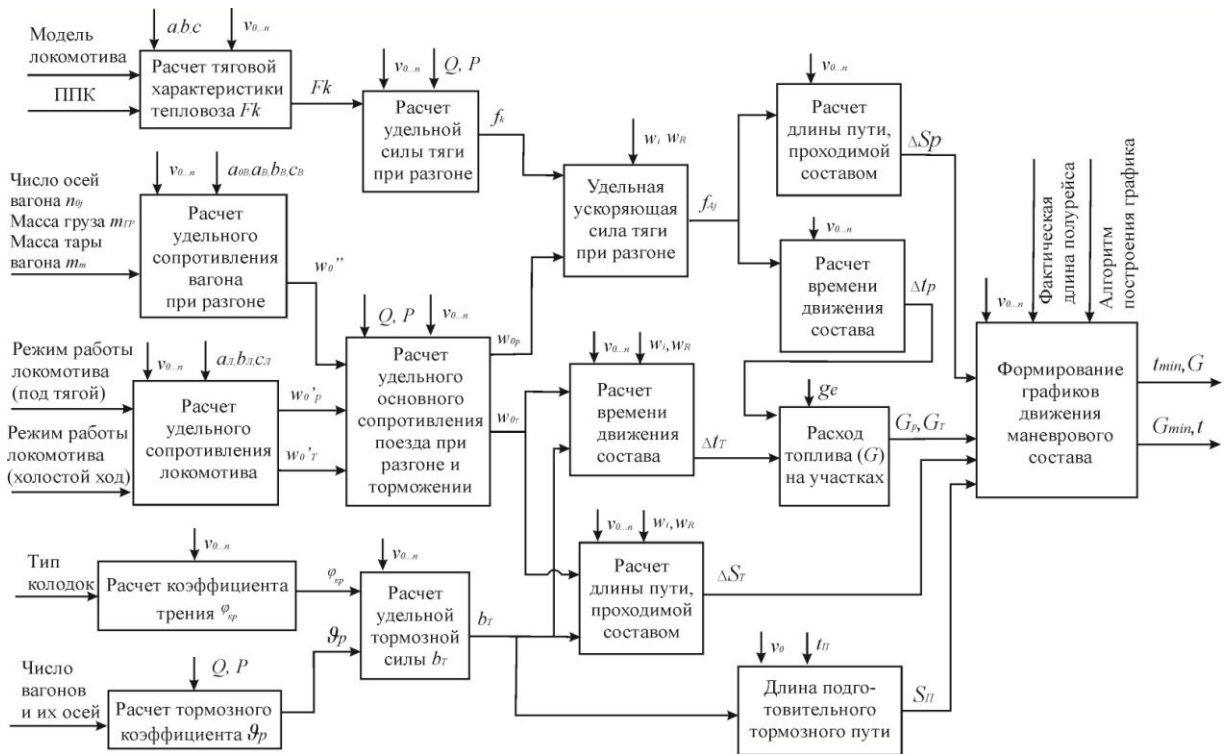


Рисунок 2 – Схема декомпозиции тяговых расчетов времени маневрового полурейса; $v_{0...n}$ – интервалы скорости движения состава, км/ч; t_{Π} – время подготовки тормозов к действию, с.; Q – масса состава, т; P – масса локомотива, т; v_0 – скорость поезда в начальный момент торможения, км/ч; $a_{ЛД}$, $b_{ЛД}$, $c_{ЛД}$ – коэффициенты основного удельного сопротивления движению локомотивов; $a_{ОВ}$, a_B , b_B , c_B – коэффициенты основного удельного сопротивления движению вагонов; a, b, c – коэффициенты из уравнений силы тяги с учетом различных позиций контроллера машиниста; w_R, w_i – дополнительное удельное сопротивление движению в кривой и руководящего уклона соответственно, Н/т; g_{ei} – удельный расход топлива в зависимости от предельной позиции контроллера (ППК), кг/мин.

Для получения времени маневрового ПР по данной методике требуется выполнять каждый раз большой объем расчетов, что в свою очередь требует значительного времени. Поэтому для ПТС был разработан программный модуль адаптированной методики тяговых расчетов.

Нахождение оптимального маршрута по сложной сети путевого развития требует процедуры переоценки весов ребер с учётом массы состава и марки локомотива. Для ускорения данного процесса предлагается использование инструментария нейросети, предварительно обученной по выборке, полученной с помощью модифицированной методики тяговых расчетов. Анализ выявил, что наиболее адекватный прогноз времени движения состава

ва можно получить с использованием нейронной сети в виде многослойного персептрона с гиперболическим тангенсом как функция активации.

Вектор входных параметров, которые многослойный персептрон будет учитывать при многофакторном прогнозировании, имеет такой вид:

$$t_{IP_i} = (l_i^{nymu}, F_k, N_i, r_{ППК}, Q_i, R_{p_i}, \gamma_i), \quad (14)$$

где N_i – число вагонов в маневровом составе; Q_i – масса состава для i -го полурейса, т. Структура многослойного персептрона содержит семь входных нейронов, два промежуточных и один выходной (7:7 – 2 – 1:1).

Адекватность построенной математической модели была доказана путем вычисления абсолютной погрешности и применения критерия Фишера.

В четвертом разделе представлены алгоритмы и программные модули, разработанные для ПТС и определено их место в процессе сбора и обработки информации для планирования маневровой работы на ПЖДТ.

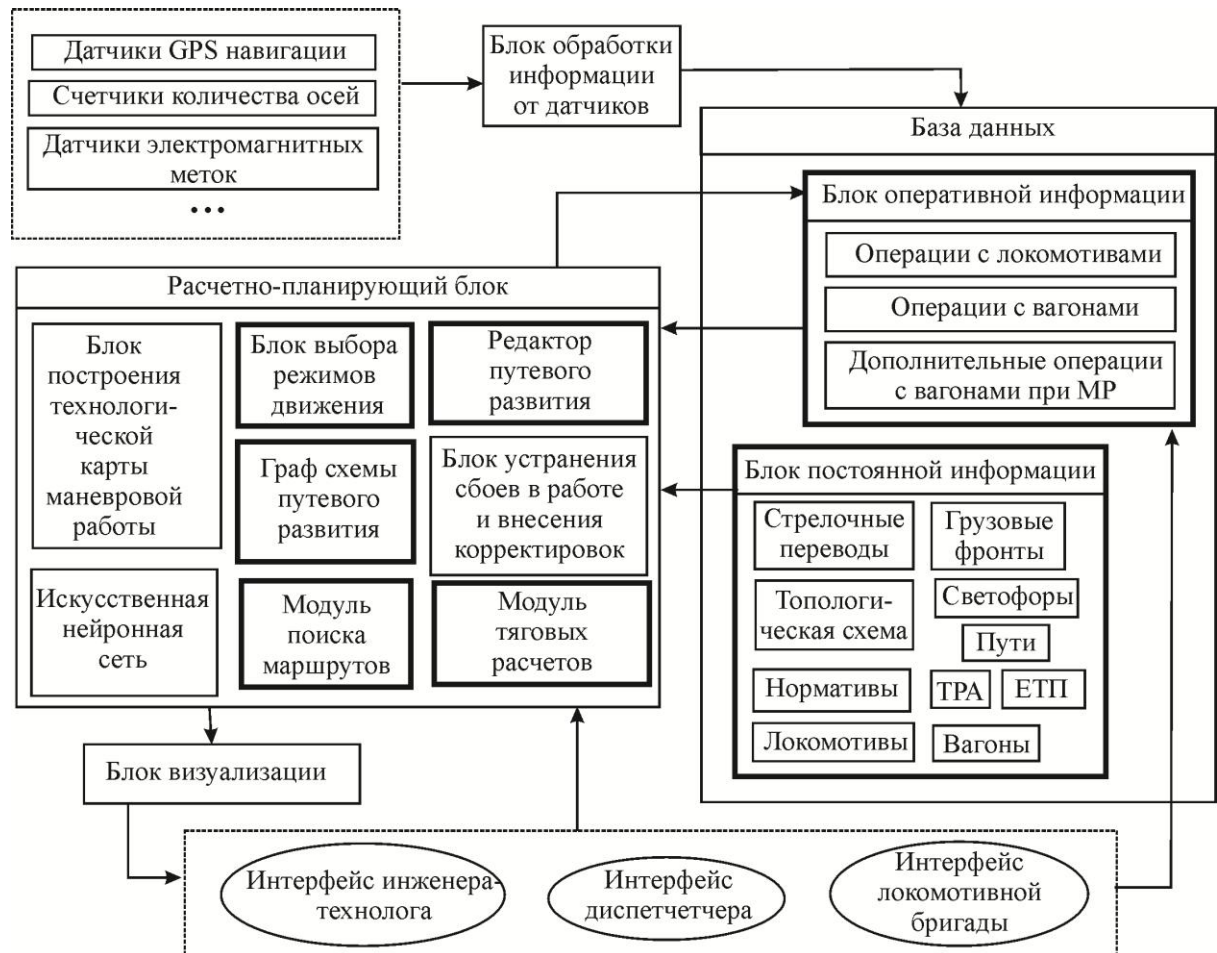


Рисунок 3 – Структурная схема информационно-вычислительной системы планирования маневровой работы

На рис.3 данные модули расположены в «Расчетно-планирующем блоке». К ним относятся: Редактор путевого развития, Граф схемы путевого

развития, Модуль поиска маршрутов следования, Модуль тяговых расчетов, Блок выбора режимов движения. Элементы расчетно-планирующего блока тесно связаны между собой. Результаты полигонных испытаний с использованием в специализированной вычислительной системе полученных модулей, представлены на рис. 4.

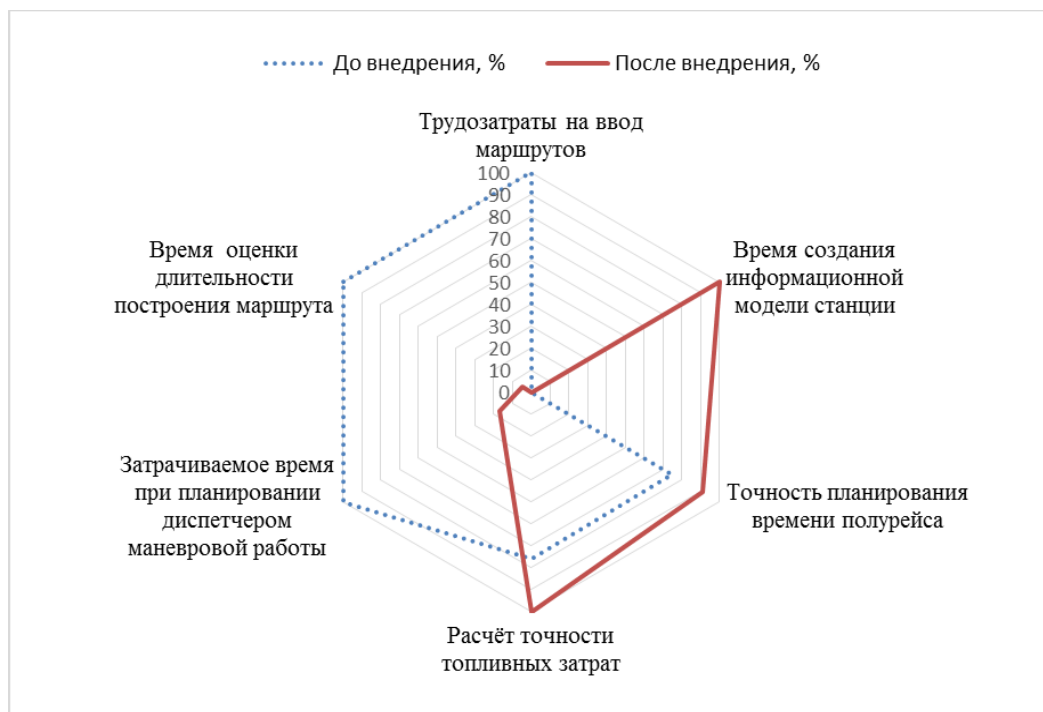


Рисунок 4 – Основные результаты внедрения

В исследованиях для крупного предприятия (на примере ООО «Донбасс-Луга») было выявлено, что на ввод 1 маршрута вручную требовалось 5 минут, что не рационально. Поэтому был разработан графический редактор путевого развития как инструмент полуавтоматического построения схематического плана путевого развития предприятия. Он также поддерживает возможность загрузки существующей масштабной схемы путевого развития, и с помощью разработанного алгоритма находит все допустимые маршруты движения, основываясь на введенных данных. Редактор путевого развития универсален и подходит для магистрального транспорта, поскольку там имеются такие же элементы инфраструктуры. На этапе внедрения процедура запуска редактора и перечерчивания выполняется однократно. Далее данные обрабатываются и путевое развитие преобразуется в неориентированный Граф схемы путевого развития, с которым начинает свою работу Модуль поиска маршрутов движения.

Граф схемы путевого развития представляется как матрица смежности, вершинами которого являются СП, мнимые вершины и тупики. Модуль поиска маршрутов, получив на вход эти данные, выполняет поиск номеров вершин, входящих в маршрут. С помощью алгоритма поиска маршрутов находятся варианты маршрутов, после чего запускается алгоритм поиска безостановочных маршрутов. Результаты вычислений и данные о структуре маршрута передаются в Модуль тяговых расчетов, где с учетом режимов движения (задаются в Блоке выбора режима движения), находятся ребра графа – время в секундах, а также длина и расход топлива.

Также в четвертом разделе сделаны выводы и обозначены направления дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ современного состояния исследований и разработок информационно-структурных моделей, алгоритмов и технических средств планирования и нормирования маневровой работы промышленного железнодорожного транспорта, обоснована необходимость создания современных информационно-структурных систем сбора, хранения и обработки информации, позволяющих повысить эффективность обслуживания предприятий.

2. Разработана информационно-структурная модель специализированной вычислительной системы планирования и нормирования маневровой работы, позволяющая формировать минимальные по времени либо по топливу маршруты маневровых перемещений состава на промышленном железнодорожном транспорте, используя алгоритм многоуровневого отбора маршрутов движения по графу путевого развития.

3. Создана специализированная вычислительная система планирования и нормирования маневровой работы с использованием нейросетевых алгоритмов и разработана методика адаптированных тяговых расчетов как информационной технологии многофакторного прогнозирования времени маневровых операций.

4. Реализован в виде программного модуля алгоритм учета структуры пути следования состава для построения схемы путевого развития, позволяющий вводить информацию о структуре путей и состоянии стрелочных переводов и преобразовать модель путевого развития в граф, по которому

выполняться поиск безостановочных маршрутов движения с учетом позиции контроллера машиниста и типа маневрового полурейса.

5. Синтезирована нейросеть в виде многослойного персептрона, обучаемая по выборке полученных по предложенной методике результатов тяговых расчетов, ее включение в специализированную вычислительную систему сокращает продолжительность многофакторного прогнозирования времени полурейса маневрового состава.

6. Создана информационно-структурная модель системы, включающая модули построения схемы путевого развития, поиска безостановочных маршрутов движения по графу станции, расчёта времени маневрового полурейса адаптированной методикой тяговых расчетов.

7. Экспериментально подтверждена эффективность разработанной информационно-структурной модели системы. Применение ее на ООО «Донбасс-Луга» позволило на 83% снизить нагрузку на диспетчера при нормировании маневровой работы, увеличить точность планирования времени рейса маневрового состава на 18%, повысить точность нормирования топливных затрат на 7%, на 14% сократить длительность расчета времени движения по маршруту. Эффект использования разработанных моделей, алгоритмов и методик на ЗАО «Внешторгсервис»: освободившийся временной ресурс диспетчера составил 15%, точность планирования маневровых передвижений возросла на 13%, топливные затраты сократились на 8%.

Научные результаты, полученные в диссертационном исследовании, использованы при выполнении НИОКР на ООО НПП «Кристалл», что подтверждается актом внедрения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в базы данных SCOPUS и Web of Science

1. Nechai T. Information and Computing System for Planning of Management of Railway Stations of Industrial Enterprises / T. Nechai, G. Korop, V. Roganov, E. Roganova, M. Chirkina // Proceedings of the International Conference Communicative Strategies of Information Society (CSIS 2018). – 2018. – P. 246–251.

2. Nechay T. Improvement of operational planning for shunting service on non-public railway lines / T. Nechay, V. Roganov, T. Zhashkova, M. Chirkina, J. Lavendels, G. Korop // Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378, Iss. 1, No. 28. – P. 1–8 (опубликовано и размещается в базе данных SCOPUS).

В изданиях, входящих в перечень ВАК

3. Нечай Т.А. Структура и функции информационной системы моделирования маневровой работы на путях необщего пользования / Т.А. Нечай // Вестник РГУПС. – 2015. – №4. – С. 53–60.

4. Нечай Т.А. Основные модули системы «Маневровая работа на путях необщего пользования» / Т.А. Нечай, Э.В. Роганова, А.А. Романова, С.В. Кривоногов // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 9 (76). – С. 7–15.

5. Нечай Т.А. Технология выбора реперных моделей объектов для формирования модели виртуального пространства / Т.А. Нечай, Т.В. Жашкова, А.М. Михеев, Н.С. Есимова, И. Е. Долганов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: «Естественные и технические науки». – 2018. – №11. – С. 88–91.

6. Нечай Т.А. Программно-аппаратная система планирования маневровой работы на промышленном железнодорожном транспорте / Т.А. Нечай, Г.В. Короп, Э.В. Роганова, С.М. Гущин, Т.А. Глебова, Т.В. Жашкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т.8. №1(45). – С. 12–16.

7. Нечай Т.А. Разработка графического редактора для специализированной информационно-вычислительной системы планирования маневровой работы на промышленном транспорте / Т.А. Нечай, В.Р. Роганов, Н.Есимова, О.А.Кувшинова, Г.В. Короп // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т.8. №4(48). – С. 97–104.

Научные публикации в прочих изданиях

8. Нечай Т.А. Моделирование операций на промышленном железнодорожном транспорте / Нечай Т.А., Севостьянова Н.О., Короп Г.В. // Прогресивні технології в науці, освіті та економіці. – Луганськ.: Вид-во ЛНПУ ім. Т.Шевченка. – 2008. – С. 38–43.

9. Нечай Т.А. Исследование методики нормирования и планирования переформирования состава методом осаживания на железнодорожном транспорте / Нечай Т.А., Роговой А.С., Клюев А.А., Титаков С.А., Овчаренко А.А. // Вісник СНУ ім.В.Даля. – Луганськ.: Вид-во СНУ ім.В.Даля, – 2010. – №1(143) ч2. – С. 137–141.

10. Пуха Е.В. Этапы разработки учебных программных продуктов для выполнения тяговых расчетов / Пуха Е.В., Соколова Я.В., Клюев А.А., Нечай Т.А. // Вісник СНУ ім.В.Даля. – Луганськ.: Вид-во СНУ ім.В.Даля, – 2012. – №3(174) – С. 169–173.

11. Ключев А.А. Автоматизация расчётов затрат на маневровую работу / А.А. Ключев, Т.А. Нечай, Е.В. Пуха // Вісник СНУ ім.В.Даля. – Луганськ.: Вид-во СНУ ім.В.Даля, – 2013. – №4(193) – С. 90–92.

12. Нечаев Г.И. Разработка графической модели подъездного пути для оперативного моделирования маневровой работы на промышленном транспорте / Г.И. Нечаев, А.А. Ключев, Ю.А. Шкандибин, Т.А. Нечай // Вісник СНУ ім.В.Даля. – Луганськ: Вид-во СНУ ім.В.Даля, – 2013. – №4(193) ч2. – С. 124–127.

13. Nechay T. The basic principles in development of the program module for calculating time of movement of enterprise's rolling stock / T.Nechay, Y.Shkandybin, A. Klyuev, T.Balitskaya // ТЕКА / Polska Akademia nauk. – Lublin, 2013. – Vol. XI B. – P. 48–53.

14. Нечай Т.А. Анализ существующих методов определения времени сортировочной маневровой работы осаживанием и вытягиванием на промышленном железнодорожном транспорте / Т.А. Нечай, Н.Б. Чернецкая, Г.В. Короп // Проблемы глобализации и модели устойчивого развития экономики: материалы I межд. научно-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых. 25-27.03.2009 г.: тезисы докл. – Луганск, – 2009. – С. 588–591.

15. Ключев А. А. Совершенствование аналитической зависимости прогнозирования времени сортировочной работы методом осаживания / А.А. Ключев, Г.В. Короп, Т.А. Нечай, А.О. Овчаренко // Модернизация процессов перевозок, систем автоматизации и телекоммуникаций на транспорте: материалы межрегиональной научно-практ. конф. с межд. уч., Хабаровск, 09 и 10 декабря 2010 г. Т.1. – Хабаровск: Из-во ДВГУПС, 2010. – С.80–85.

16. Нечай Т.А. Применение динамического программирования при планировании маневровой работы на промышленном предприятии / Нечай Т.А., Пуха Е.В., Ключев А.А. // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования: труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции 10-13 апреля 2012 г.: тезисы докл. – Хабаровск: ДВГУПС – 2012. – Т.2. – С. 19–23.

17. Ключев А.А. Автоматизация расчётов затрат на маневровую работу / Ключев А.А., Нечай Т.А., Пуха Е.В. // Інноваційні технології на залізничному транспорті: збірник наукових праць конф., 24-31.03.2013 р. : тези допов. - м. Париж (Франція) – 2013. – С. 25–26.

18. Ключев А.А. Применение нейросетей в оперативном нормировании маневровой работы / Ключев А.А., Нечай Т.А., Соснов Н.Ю. // Сучасні

тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції 11 – 12 квітня 2013 р.: тези допов. – Луганськ: ДЗ ЛНУ ім. Т. Шевченка –2013. – С. 35–36.

19. Нечай Т.А. Описание системы построения технологической карты маневровой работы / Т.А Нечай, А.А. Ключев, Ю.А.Шкандыбин // Сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции (01 февраля 2016 г.). – Новочеркасск, 2016. – С. 109–114.

20. Нечай Т.А. Улучшение оперативного планирования маневровой работы на путях необщего пользования / Т.А. Нечай, Т.А. Герасименко, А.В. Герасименко, В.Р. Роганов // Современные технологии и развитие политехнического образования (19-23.09.2016). – Владивосток, 2016. – С. 992–996.

21. Гришина Ю.В. К постановке задачи нахождения оптимального решения / Ю.В.Гришина, Т.А. Нечай, Н.С. Есимова // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований. Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции (20-22 сентября 2017 г.). – Пенза, 2017. – С. 21–24.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

22. Компьютерная программа «Транспорт 08.М.У» [Текст] авторское право на произведение №28189 Украина, Короп Г.В., Титаков С.А., Овчаренко А.А., Шикун О.В., Нечай Т.А., – 2009.

23. Компьютерная программа «Транспорт» [Текст] авторское право на произведение №28521 Украина, Короп Г.В., Нечаев Г.И., Шкандыбин Ю.А., Пительгузов Н.А., Нечай Т.А., – 2009.

24. Компьютерная программа «Маневровые маршруты» [Текст] авторское право на произведение №63479 Украина, Нечай Т.А., Могильный Г.А., Шкандыбин Ю.А., Попов В.В.– 2016.

Монография

Нечай Т.А. Модели и алгоритмы систем планирования технологических процессов локального железнодорожного комплекса промышленного предприятия / Е.А. Асмолова, Г.В. Короп, М.Ю. Михеев, Т.А. Нечай, А.П. Ремонтов, В.Р. Роганов: Монография – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. ун-т, 2016. – 112 с.