

П. Н. Мишуров

КОНЦЕПЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ *

Аннотация. Предложена концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе комбинирования методов многокритериального анализа, маршрутизации на специализированных графах транспортной инфраструктуры, динамической оптимизации на пространственно-временных графах, имитационного моделирования и графовой нейронной сети. Сочетание методов необходимо для прогнозирования и оптимизации параметров транспортно-логистических процессов в режиме реального времени. Показана возможность использования предлагаемой комбинации методов при формировании оптимальных последовательностей транспортно-логистических процессов и синхронизации оперативного управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия. Разработанный подход позволит повысить эффективность транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в результате комплексной реализации методов пространственно-временной оптимизации.

Ключевые слова: транспортно-логистический процесс, пространственно-временная оптимизация, концепция, комбинирование методов, промышленное предприятие.

Для цитирования: Мишуров, П. Н. Концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий / П. Н. Мишуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025 – № 2. – С. 219–230. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_219.

Введение

Рост потребности промышленных предприятий в своевременности транспортного обслуживания структурных подразделений и стремление к сокращению транспортно-складских затрат в результате уменьшения размера транспортной партии, наряду с необходимостью соблюдения интересов собственников подвижного состава и руководства транспорта общего пользования, привели к структурному и технологическому усложнению транспортно-логистических процессов, а также повышению требований к их эффективности. В отмеченных условиях растет необходимость реализации системного подхода и оценки множества стохастических факторов при выработке оптимальных решений по повышению эффективности транспортно-логистических процессов [1] и, как следствие, активное применение различных комбинаций методов прогнозирования, оптимизации и анализа транспортно-логистических процессов [2], а также совершенствование способов повышения адаптивности использования таких методов [3, 4]. Актуальной задачей становится разработка подходов, которые позволят обеспечить переход от традиционных информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем промышленных предприятий к интеллектуальным транспортно-логистическим системам, способным обеспечить принятие оптимальных решений в режиме реального времени [5].

Совершенствование информационных технологий [6], интенсивное распространение концепций Индустрии 4.0 [7] и Интернета вещей [8] сформировали предпосылки к получению больших объемов динамических достоверных данных о параметрах транспортных систем [9], а также использованию этих данных для принятия оптимальных решений в режиме реального времени [10]. Размерность задач оперативного управления в транспортной отрасли расширяется в связи с необходимостью анализа больших объемов текущих данных [11]. Поэтому практическое применение методов оптимизации, прогнозирования и анализа транспортно-логистических процессов нашло свое отражение при построении информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем [12].

В условиях ускоренного внедрения новых цифровых технологий и усиления тенденции к автоматизации управленческой деятельности на промышленных предприятиях становятся критически актуальными задачи интеллектуализации транспортно-логистических процессов [13]. Для интеллекту-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00164. – URL: <https://rscf.ru/project/23-11-00164>.

ального сопровождения транспортно-логистических процессов в условиях функционирования сложных транспортно-логистических систем используются различные комбинации методов прогнозирования, оптимизации и анализа состояния систем [14]. Появились новые подходы к созданию адаптивных информационных систем [15], экспертных [16, 17] и самообучающихся [18] систем поддержки принятия управленческих решений на основе использования комбинированных методов на различных уровнях управления с учетом возможных ограничений.

Основным ограничением использования комбинированных методов является недостаточная точность результатов их применения в условиях высокой динамики загруженности транспортной инфраструктуры и многовариантности последовательностей технологических операций транспортно-логистических процессов. Это связано с большим количеством технологических операций по переработке и продвижению грузопотоков в транспортно-логистической системе. Программная реализация одноцелевых [17] или многоцелевых методов оптимизации [19] в составе действующих информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем обеспечивает выбор оптимального решения из набора заранее сформированных. Такой подход не позволяет выбирать оптимальные решения в нестандартных ситуациях, для которых не предусмотрены готовые варианты [20]. Регистрация больших объемов оперативных данных приводит к увеличению размерности таких математических моделей и замедлению получения оптимального решения [21]. Попытки учесть данные пространственно-временные зависимости при оперативном регулировании транспортно-логистических процессов промышленных предприятий оборачиваются необходимостью решать задачи большой размерности, которые можно отнести к NP-сложным, и, как следствие, ограничениями использования представленных методов и моделей [22].

Ограничения первого уровня связаны с описанием инфраструктуры элементов транспортно-логистических систем. Традиционно элементы транспортной инфраструктуры представляются в моделях абстрактным графом. Теория графов в настоящее время является интенсивно развивающимся разделом математики. Основное направление использования теории графов при решении транспортных задач – это маршрутизация перевозок [23], а в последнее время разрабатываются новые методы оптимизации графов [24]. Например, для условий работы железнодорожного транспорта необщего пользования использование традиционных методик построения графа маршрутизации перевозок ограничено рядом условий, от которых зависят маршруты движения поездов и маневровых составов [25]. Если маршрут состоит из нескольких маневровых полурейсов, то необходимо менять направление движения поезда. Кроме изменения направления движения поезда на параметры маршрута оказывают влияние такие факторы, как виды маневрового полурейса и расположение парков железнодорожных путей (параллельное, последовательное, комбинированное). Для учета этих факторов в моделях используются различные способы формирования графа маршрутизации железнодорожных перевозок. В научной литературе к методам формирования структуры графов железнодорожных перевозок относят классический [26], двухвершинный [27] и рёберный [28]. Выбор метода формирования структуры графа зависит от уровня сложности как путевого развития железнодорожной станции и узла, так и технологии переработки вагонопотоков [25].

Многокритериальность целей участников транспортно-логистических процессов промышленного предприятия является ограничением второго уровня. Анализ алгоритмов многоцелевой оптимизации показывает снижение их вычислительной эффективности по мере усложнения структуры оптимизируемой транспортной системы или увеличения вариантов возможных решений [29]. Решение данной проблемы особенно актуально для железнодорожных промышленных транспортных систем, управление эксплуатационной работой в которых отличается повышенной сложностью из-за наличия множества противоречивых критериев производства, железнодорожного транспорта общего пользования, грузовладельцев и собственников вагонов, диспетчеров промышленного железнодорожного узла (вагонного, поездного, тягового и станционного). Перспективным направлением преодоления данных ограничений является использование многокритериальных методов принятия решений [30] (*MCDM – Multi-Criteria Decision Making*) для оценки эксплуатационной обстановки.

Ограничением третьего уровня является сложность структуры задач оптимизации, например задач динамического согласования производства и транспорта [31], динамической оптимизации параметров вагонопотоков [32]. Большая размерность таких задач для условий функционирования транспортно-логистических систем промышленных предприятий обусловлена наличием разветвленной схемы путевого развития и высокой динамикой ее загруженности множеством технологических операций транспортно-логистических процессов по переработке элементов грузопотоков. Кроме того,

имеют место структурное и функциональное несоответствия систем оперативного управления производством и транспортом, различия применяемых способов и методов оперативного регулирования, разница длительности технологических циклов, связанных с переработкой элементов грузопотоков. Широкое применение при решении таких задач в течение заданного отрезка времени и с необходимой точностью нашли адаптированные алгоритмы, построенные на основе нейронных сетей [33].

Перспективным направлением развития нейросетевых алгоритмов для решения задач оптимального прогнозирования транспортно-логистических процессов являются методы пространственно-временной оптимизации [34]. Решение задач пространственно-временной оптимизации заключается в сокращении оптимизируемого пространства путем представления его в виде пространственно-временного графа на основе использования графовой нейронной сети и методов динамической оптимизации [22]. Графовые и гибридные нейронные сети теоретически способны учитывать сложные пространственно-временные зависимости на основе распознавания текущего состояния транспортной инфраструктуры [35]. Однако для обучения таких нейронных сетей необходимо формировать множество сценариев развития эксплуатационной обстановки. Адаптивность их использования в режиме реального времени снижается по мере увеличения рассогласованности управленческих решений, принимаемых оперативным руководящим составом и рекомендуемых нейронной сетью. Перспективным направлением повышения адаптивности алгоритмов пространственно-временной оптимизации является использование высокодетализированных имитационных моделей транспортно-логистических процессов [36].

Пространственно-временная оптимизация транспортно-логистических процессов промышленных предприятий

Предлагается подход к прогнозированию транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в режиме реального времени на основе использования методов пространственно-временной оптимизации [22]. Основой данного подхода является комбинация методов, в числе которых:

- многокритериальный анализ для оценки эксплуатационной обстановки, определения и корректирования значимости критериев эффективности транспортно-логистических процессов [22];
- методы оптимизации на специализированных графах для решения задач автоматической маршрутизации с учетом технологии переработки грузопотоков [25];
- формирование пространственно-временного графа и его динамическая оптимизация для определения оптимальной последовательности транспортно-логистических процессов [22];
- метод имитационного моделирования для высокодетализированного цифрового описания технологии переработки грузопотоков [36] и формирования сценариев развития эксплуатационной обстановки с последующим обучением графовых нейронных сетей;
- графовая нейронная сеть формирования последовательности транспортно-логистических процессов для синхронизации оперативного управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия на основе использования сценариев развития эксплуатационной обстановки, полученных по результатам динамической оптимизации и имитационного моделирования.

Основными положениями концепции являются:

1 Мониторинг эксплуатационной обстановки на основе комплексного использования систем оперативной регистрации данных о наличии резервов пропускной и перерабатывающей способностей транспортной инфраструктуры, структуре грузопотоков, ресурсном обеспечении, заявках и графиках транспортного обслуживания структурных подразделений промышленного предприятия, показателях взаимодействия участников транспортно-логистических процессов (производство, транспорт общего и необщего пользования, собственники подвижного состава и инфраструктуры), погодных условиях.

2 Достижение баланса конфликтующих критериев эффективности транспортно-логистических процессов на основе многокритериального анализа эксплуатационной обстановки. Использование коэффициентов значимости (весовых коэффициентов) критериев эффективности в задаче пространственно-временной оптимизации [30].

3 Формализация сценариев развития эксплуатационной обстановки в виде пространственно-временного графа транспортно-логистических процессов.

4 Описание транспортной инфраструктуры в виде специализированного графа (рёберный граф, двухвершинный граф) для реализации методов маршрутизации элементов грузопотоков [25].

5 Оценка вариантов использования транспортной инфраструктуры технологическими операциями при различной структуре грузопотоков в различные моменты времени на основе динамической оптимизации пространственно-временного графа транспортно-логистических процессов [14].

6 Построение графовой нейронной сети на основе пространственно-временного графа [37].

7 Прогнозирование транспортно-логистических процессов в режиме реального времени, включая занятость элементов транспортной инфраструктуры и структуру грузопотоков, на основе использования графовой нейронной сети [9].

8 Обучение графовой нейронной сети и корректировка пространственно-временных зависимостей на основе применения имитационных моделей транспортно-логистических процессов. Использование имитационных моделей позволит сформировать базу решений в зависимости от эксплуатационной обстановки, а также оценить новые решения с учетом ее изменения. Формирование множества решений, обновление и корректировка этого множества осуществляются на основе оценки вариантов изменения параметров транспортно-логистических процессов (рис. 1).



Рис. 1. Схема концепции пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий

Соблюдение представленных положений предполагается осуществлять в четыре основных этапа комбинирования методов пространственно-временной оптимизации:

1 Подготовка исходных данных. Для оценки эксплуатационной обстановки предлагается двух-уровневая система ее индикаторов. На первом уровне выполняется сбор данных о наличии резервов пропускной и перерабатывающей способностей транспортной инфраструктуры, заявках и графиках транспортного обслуживания структурных подразделений, структуре транспортных потоков, ресурсном обеспечении, показателях взаимодействия стейкхолдеров, погодных условиях. Индикаторами второго уровня выступают требования участников транспортно-логистических процессов промышленного предприятия.

2 Оценка эксплуатационной обстановки. Данный этап обосновывается наличием приоритетов обработки разных грузопотоков, а также противоречивостью целей участников транспортно-логистических процессов. Для достижения баланса конфликтующих критериев эффективности транспортно-логистических процессов используется групповой метод многокритериального анализа [30]. Результатами оценки эксплуатационной обстановки являются коэффициенты значимости (весовые коэффициенты) критериев эффективности задачи пространственно-временной оптимизации.

3 Прогнозирование эксплуатационной обстановки. На этом этапе пространственно-временной оптимизации формируется вариант развития эксплуатационной обстановки на основе использования графовой нейронной сети. Предполагается, что на данном этапе графовая нейронная сеть обладает накопленными данными о пространственно-временных зависимостях транспортно-логистических процессов (рис. 2). Основой разработанного способа формирования графовой нейронной сети являются пространственно-временной граф и методы его динамической оптимизации.

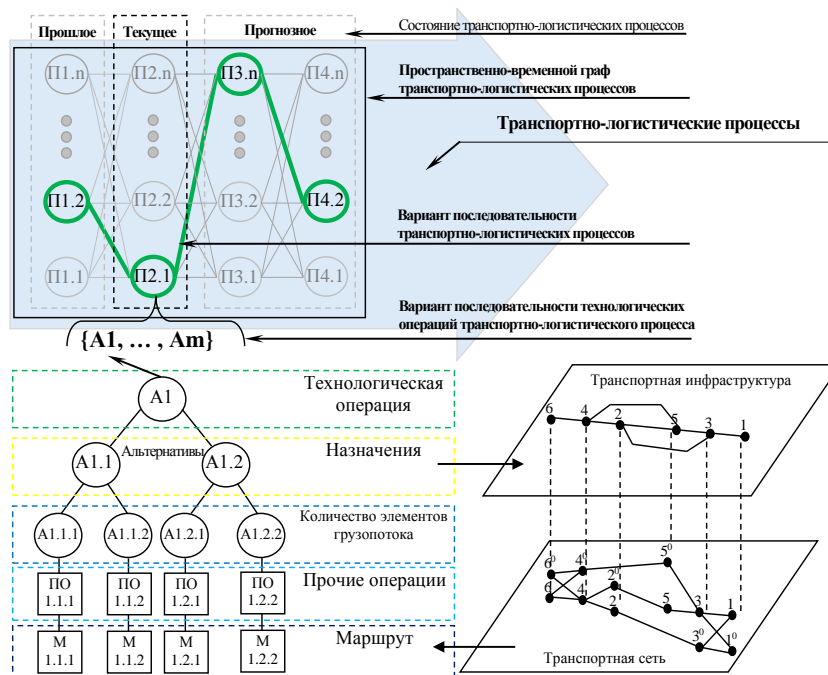


Рис. 2. Структура последовательности транспортно-логистических процессов

Слой пространственных зависимостей служит для формирования вариантов использования транспортной инфраструктуры на основе использования специализированного графа маршрутизации [14]. Анализ существующих методов формирования графов для условий железнодорожных перевозок позволяет говорить о преимуществах специализированных графов маршрутизации, где в качестве вершин графа описываются стрелочные переводы, а в качестве ребер – станционные пути [32]. С другой стороны, структура графа железнодорожного узла состоит из станций и перегонов. Такое представление путевого развития связано с отсутствием дополнительных преобразований для графовых нейронных сетей [38]. Результатом данного слоя являются варианты занятости элементов путевого развития. Варианты значений параметров грузопотоков и индикаторов эксплуатационной обстановки в различные моменты времени формируются в слое временных зависимостей. Предлагаемый способ формирования нейронной сети позволит сократить размер задачи пространственно-временной оптимизации [39].

Полученные варианты использования транспортной инфраструктуры технологическими операциями при различной структуре грузопотоков в разные моменты времени образуют пространственно-временной граф транспортно-логистических процессов. Поиск наиболее приемлемого варианта развития эксплуатационной обстановки осуществляется на основе методов динамической оптимизации этого графа с учетом весовых коэффициентов критериев эффективности транспортно-логистических процессов. Оптимальный вариант последовательности транспортно-логистических процессов, включая технологические операции, занятость элементов транспортной инфраструктуры и структуру грузопотоков в различные моменты времени, является результатом графовой нейронной сети.

4 Обучение графовой нейронной сети и корректировка пространственно-временных зависимостей. Необходимость данного этапа обусловлена наличием случайных факторов. Например, для путей необщего пользования характерны изменения требований структурных подразделений промышленных предприятий к своевременности перевозок, очередности подачи вагонов на грузовые фронты, ошибки или задержки в подготовке документов, неправильное размещение груза в вагоне и т. д. Повысить адаптивность использования методов пространственно-временной оптимизации предлагается на основе применения имитационных моделей функционирования элементов транспортно-логистической системы. Использование имитационных моделей позволит сформировать базу управленческих решений в зависимости от эксплуатационной обстановки, а также оценить новые управленческие решения с учетом ее изменения. Формирование множества управленческих решений, обновление и корректировка этого множества осуществляются на основе оценки вариантов изменения параметров транспортно-логистических процессов.

Реализация методов пространственно-временной оптимизации сопровождается рядом ограничений, обладающих разными уровнями сложности. Данные ограничения связаны с барьерами в повы-

шении эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий. Выделены четыре группы решений, основанных на методах адаптации (параметрической, структурной и функциональной) [40] (таблица).

Этапы повышения эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации

Объект повышения эффективности	Этапы и методы адаптации							
	1-й этап. Корректирование параметров ТЛП		2-й этап. Параметрическая адаптация		3-й этап. Структурная адаптация		4-й этап. Функциональная адаптация	
	Проблема	Решение	Проблема	Решение	Проблема	Решение	Проблема	Решение
Транспортно-логистические процессы (ТЛП)	Наличие отклонений от плановых значений параметров ТЛП	Корректирование графиков движения грузопотоков	Недостаточная эффективность регулирования параметров ТЛП в нестандартных ситуациях	Выработка оптимальных решений в нестандартных ситуациях	Разрешение конфликтов ТЛП	Комплексная оценка эксплуатационной обстановки на основе использования пространственно-временного графа	Наличие несогласованных действий участников ТЛП	Согласованное прогнозирование ТЛП в режиме реального времени
		Корректирование загруженности транспортной инфраструктуры						
		Корректирование структуры грузопотоков	Наличие несогласованных действий участников ТЛП	Многокритериальный анализ эффективности ТЛП				
		Корректирование графиков транспортного обслуживания						
	Наличие «черных ящиков» в данных о параметрах грузопотоков и занятости инфраструктуры	Регистрация данных о циклах транспортного обслуживания	Отсутствие данных о временных зависимостях технологических операций от параметров ТЛП	Анализ оперативных данных о времени выполнения технологических операций ТЛП	Низкая точность обнаружения конфликтов ТЛП	Использование пространственно-временных данных для индикаторов эксплуатационной обстановки		
		Регистрация данных о времени появления грузопотока						
		Регистрация данных о местоположении элементов грузопотоков	Отсутствие данных о пространственных зависимостях пропускной способности от параметров ТЛП	Анализ оперативных данных о наличной пропускной способности				
		Регистрация данных о занятости элементов инфраструктуры						

Наличие отклонений от плановых значений параметров транспортно-логистических процессов и неполнота данных о параметрах грузопотоков и занятости инфраструктуры являются барьером в повышении эффективности первого уровня. Для преодоления данного барьера используются современные адаптивные методы корректирования графиков движения грузопотоков, загруженности транспортной инфраструктуры, структуры грузопотоков, графиков транспортного обслуживания. Эффективность использования таких методов зависит от полноты исходных данных и оперативности их регистрации в информационных системах управления элементами транспортно-логистических систем.

Переход с уровня корректирования к изменению параметров транспортно-логистических процессов (параметрической адаптации) осуществляется по причине недостаточной эффективности их регулирования в нестандартных ситуациях, наличия несогласованных действий участников, а также от-

сутствия данных о временных и пространственных зависимостях технологических операций от параметров транспортно-логистических процессов.

Наличие конфликтов транспортно-логистических процессов при низкой точности их обнаружения является барьером третьего уровня в повышении эффективности транспортно-логистических процессов. Для преодоления данного барьера необходимо проводить комплексную оценку эксплуатационной обстановки на основе использования больших пространственно-временных данных, которые предлагается формализовать в виде пространственно-временного графа структуры последовательности транспортно-логистических процессов (структурная адаптация). Основным ограничением реализации решений структурной адаптации методов пространственно-временной оптимизации является наличие несогласованных действий участников транспортно-логистических процессов по их прогнозированию в режиме реального времени.

Результатом этапного преодоления ограничений повышения эффективности транспортно-логистических процессов является их согласованное прогнозирование в режиме реального времени на основе комбинирования методов пространственно-временной оптимизации.

Выводы

Предложена концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий, основанная на комбинации методов многокритериального анализа, маршрутизации на специализированных графах транспортной инфраструктуры, динамической оптимизации на пространственно-временных графах, имитационного моделирования и графовой нейронной сети. Комбинация методов необходима для прогнозирования и оптимизации параметров транспортно-логистических процессов в режиме реального времени. Теоретически показана возможность повышения эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе формирования оптимальных последовательностей транспортно-логистических процессов и синхронизации оперативного управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия. Использование предлагаемой концепции позволит повысить точность оценки эксплуатационной обстановки на основе определения и корректирования значимости критериев эффективности транспортно-логистических процессов, определить оптимальные последовательности транспортно-логистических процессов на основе формирования пространственно-временного графа и его динамической оптимизации, формировать сценарии развития эксплуатационной обстановки с последующим обучением графовых нейронных сетей на основе высокодетализированного цифрового описания технологии переработки грузопотоков в имитационных моделях элементов транспортно-логистических систем, прогнозировать транспортно-логистические процессы промышленных предприятий на основе формирования оптимальных сценариев развития эксплуатационной обстановки в режиме реального времени, полученных графовой нейронной сетью. Разработанный комбинированный метод пространственно-временной оптимизации предлагается использовать для оперативной оценки эксплуатационной обстановки с последующим согласованным оптимальным прогнозированием транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в режиме реального времени. Дальнейшим направлением развития предлагаемой концепции является исследование методов формирования пространственно-временных нейронных сетей и их обучения.

Список литературы

- 1 **Козлов, П. А.** Автоматизированное управление процессами в транспортном узле / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. Ю. Пермикин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 118–122. – ISSN 0201-727X.
- 2 **Рахмангулов, А. Н.** Железнодорожные транспортно-технологические системы : организация функционирования / А. Н. Рахмангулов, О. А. Копылова, П. Н. Мишкurov. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2014. – 300 с. – ISBN 978-5-9967-0458-0.

References

- 1 **Kozlov, P. A.** Automated process control of processes in a transport hub / P. A. Kozlov, O. V. Osokin, V. Yu. Permikin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2013. – No. 2 (50). – P. 118–122. – ISSN 0201-727X.
- 2 **Rakhmangulov, A. N.** Railway transport and technological systems : organization of functioning / A. N. Rakhmangulov, O. A. Kopylova, P. N. Mishkurov. – Magnitogorsk : Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. – 300 p. – ISBN 978-5-9967-0458-0.

3 Методы гибридной технологии имитационного моделирования при выборе вариантов реконструктивных мероприятий по развитию железнодорожных направлений и крупных узлов / А. Ф. Бородин, А. А. Кравченко, К. Ю. Николаев [и др.] // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021) : труды Четырнадцатой международной конференции. – Москва, 2021. – С. 963–971. – DOI 10.25728/4783.2021.67.10.001.

4 Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

5 **Keita, K.** A three-step Benders decomposition for the real-time Railway Traffic Management Problem / K. Keita, P. Pellegrini, J. Rodriguez // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2020. – Vol. 13. – Article no. 100170. – ISSN 2210-9706.

6 Design of an ITS for Industrial Enterprises / A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Osintsev // Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – Vol. 32. – P. 161–215. – DOI 10.1007/978-3-319-19150-8_6.

7 Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry : A systematic review / C. Laiton-Bonadiez, J. W. Branch-Bedoya, J. Zapata-Cortes [et al.] // Sensors (Basel, Switzerland). – 2022. – Vol. 22, No. 7. – P. 2491. – ISSN 1424-8220.

8 An overview of current challenges and emerging technologies to facilitate increased energy efficiency, safety, and sustainability of railway transport / Z. Kljaić, D. Pavković, M. Cipek [et al.] // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 11. – P. 347. – ISSN 1999-5903.

9 Spatio-temporal graph neural networks for predictive learning in urban computing : A survey / G. Jin, Y. Liang, Y. Fang [et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2023. – Vol. 36, No. 10. – P. 5388–5408. – ISSN 1041-4347.

10 The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics : a systematic literature review (2012-2020) to explore future research opportunities / X. Sun, H. Yu, W. D. Solvang [et al.] // Environmental science and pollution research international. – 2022. – Vol. 29, No. 7. – P. 9560–9591. – ISSN 0944-1344.

11 **Anda, C.** Transport modelling in the age of big data / Cuauhtemoc Anda, Alexander Erath, Pieter

3 Methods of hybrid simulation technology in the selection of options for reconstructive measures for the development of railway routes and large junctions / A. F. Borodin, A. A. Kravchenko, K. Yu. Nikolaev [et al.] // Management of the development of large-scale systems (MLSD'2021) : Proceedings of the Fourteenth International Conference. – Moscow, 2021. – P. 963–971. – DOI 10.25728/4783.2021.67.10.001.

4 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

5 **Keita, K.** A three-step Benders decomposition for the real-time Railway Traffic Management Problem / K. Keita, P. Pellegrini, J. Rodriguez // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2020. – Vol. 13. – Article no. 100170. – ISSN 2210-9706.

6 Design of an ITS for Industrial Enterprises / A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Osintsev // Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – Vol. 32. – P. 161–215. – DOI 10.1007/978-3-319-19150-8_6.

7 Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry : A systematic review / C. Laiton-Bonadiez, J. W. Branch-Bedoya, J. Zapata-Cortes [et al.] // Sensors (Basel, Switzerland). – 2022. – Vol. 22, No. 7. – P. 2491. – ISSN 1424-8220.

8 An overview of current challenges and emerging technologies to facilitate increased energy efficiency, safety, and sustainability of railway transport / Z. Kljaić, D. Pavković, M. Cipek [et al.] // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 11. – P. 347. – ISSN 1999-5903.

9 Spatio-temporal graph neural networks for predictive learning in urban computing : A survey / G. Jin, Y. Liang, Y. Fang [et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2023. – Vol. 36, No. 10. – P. 5388–5408. – ISSN 1041-4347.

10 The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics : a systematic literature review (2012-2020) to explore future research opportunities / X. Sun, H. Yu, W. D. Solvang [et al.] // Environmental science and pollution research international. – 2022. – Vol. 29, No. 7. – P. 9560–9591. – ISSN 0944-1344.

11 **Anda, C.** Transport modelling in the age of big data / Cuauhtemoc Anda, Alexander Erath, Pieter Jacobus Fourie // International Journal of Urban Sciences. – 2017. – Vol. 21, No. S1. –

Jacobus Fourie // International Journal of Urban Sciences. – 2017. – Vol. 21, No. S1. – P. 19–42. – DOI 10.1080/12265934.2017.1281150.

12 Инновационные процессы логистического менеджмента в интеллектуальных транспортных системах : монография. В 4 т. Т. 4 / Л. А. Андреева, В. В. Багинова, А. С. Балалаев [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 499 с. – ISBN 978-5-89035-870-7.

13 **Adamko, N.** Agent based simulation of transportation logistic systems / N. Adamko, A. Kavicka, V. Klima // DAAAM International Scientific Book 2007, chapter 36 / B. Katalinic (ed.). – Vienna, Austria : DAAAM International Publishing, 2007. – P. 407–422. – DOI 10.2507/daaam.scibook.2007.36.

14 Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкurov, Д. В. Александрин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (55). – С. 43–59. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.

15 **Ерофеев, А. А.** Прогнозирование продолжительности выполнения технологических операций в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев, С. Ю. Чапский // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 52–56. – ISSN 2227-1120.

16 **Осокин, О. В.** Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте / О. В. Осокин // Транспорт Урала. – 2013. – № 4. – С. 3–7. – ISSN 1815-9400.

17 **Козлов, П. А.** О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, В. С. Колокольников // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 2. – С. 70–76. – ISSN 2074-9325.

18 Performance evaluation of a parallel ant colony optimization for the real-time train routing selection problem in large instances / B. Pascariu, M. Samà, P. Pellegrini [et al.] // European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (Part of EvoStar). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 46–61. – DOI 10.1007/978-3-031-04148-8_4.

19 **Осьминин, А. Т.** О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом / А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт. – 2021. – №. 3. – С. 17–27. – ISSN 0044-4448.

P. 19–42.

DOI 10.1080/12265934.2017.1281150.

12 Innovative processes of logistics management in intelligent transport systems : monograph. In 4 vols. Vol. 4 / L. A. Andreeva, V. V. Baginova, A. S. Balalaev [et al.]. – Moscow : Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2015. – 499 p. – ISBN 978-5-89035-870-7.

13 **Adamko, N.** Agent based simulation of transportation logistic systems / N. Adamko, A. Kavicka, V. Klima // DAAAM International Scientific Book 2007, chapter 36 / B. Katalinic (ed.). – Vienna, Austria : DAAAM International Publishing, 2007. – P. 407–422. – DOI 10.2507/daaam.scibook.2007.36.

14 Simulation models in digital twins of railway junctions / A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov, P. N. Mishkurov, D. V. Alexandrin // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2022. – No. 3 (55). – P. 43–59. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.

15 **Yerofeev, A. A.** Forecasting the duration of technological operations in an intelligent transportation process management system / A. A. Yerofeyev, S. Yu. Chapsky // Bulletin of the Belarusian State University of Transport : Science and Transport. – 2022. – No. 1 (44). – P. 52–56. – ISSN 2227-1120.

16 **Osokin, O. V.** Intellectual support of production processes in railway transport / O. V. Osokin // Transport of the Urals. – 2013. – No. 4. – P. 3–7. – ISSN 1815-9400.

17 **Kozlov, P. A.** On the construction of intelligent control systems for railway stations / P. A. Kozlov, S. P. Vakulenko, V. S. Kolokolnikov // Science and Technology of Transport. – 2019. – No. 2. – P. 70–76. – ISSN 2074-9325.

18 Performance evaluation of a parallel ant colony optimization for the real-time train routing selection problem in large instances / B. Pascariu, M. Samà, P. Pellegrini [et al.] // European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (Part of EvoStar). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 46–61. – DOI 10.1007/978-3-031-04148-8_4.

19 **Osminin, A. T.** On the development of an intelligent transportation process management system / A. T. Osminin // Railway Transport. – 2021. – No. 3. – P. 17–27. – ISSN 0044-4448.

20 Интеллектуализация транспортного обслуживания металлургических предприятий / А. Н. Рахмангулов, Н. А. Осинцев, П. Н. Мишкурков, О. А. Копылова // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 115–118. –

DOI 10.6084/m9.figshare.14134226.v1.

21 **Карелин, В. П.** Модели и методы теории графов в системах поддержки принятия решений / В. П. Карелин // Вестник Таганрогского института управления и экономики. – 2014. – № 2 (20). – С. 69–73. – ISSN 2071-9604.

22 **Rakhmangulov, A.** Spatio-temporal graphs in transportation : challenges, optimization, and prospects / A. Rakhmangulov, N. Osintsev, P. Mishkurov // Systems. – 2025. – Vol. 13, No. 4. – P. 263. – DOI 10.3390/systems13040263.

23 **Ahuja, R.** Network flows : theory, algorithms, and applications / R. Ahuja, T. Magnanti, J. Orlin // Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1993. – 840 p. – ISBN 0-13-617549-X.

24 **El-Sherbeny, N. A.** The algorithm of the time-dependent shortest path problem with time windows / N. A. El-Sherbeny // Applied Mathematics. – 2014. – No. 5 (17). – P. 2764–2770. – DOI 10.4236/am.2014.517264.

25 **Мишкурков, П. Н.** Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции / П. Н. Мишкурков, А. Н. Рахмангулов, О. В. Фридрихсон // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (51). – С. 50–64. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64.

26 **Völz, W. D.** Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie / W. D. Völz // Vorträge der Jahrestagung 1977 / Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR. Physica-Verlag HD, 1978. – P. 440–449.

27 **Montigel, M.** Formal representation of track topologies by double vertex graphs / M. Montigel // Computers in Railways III : Proceedings of the Third International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Comprail 92) / edited by T. K. Murthy. – Washington, DC, U.S.A. : WIT Press, 1992. – P. 359–370.

28 A multi scalable model based on a connexity graph representation / L. Gély, G. Dessagne, P. Pesneau, F. Vanderbeck // COMPRAIL 2010 / edited by B. Ning, C. A. Brebbia : WIT Transactions on The Built Environment. – Beijing, China : WIT Press Southampton, UK, 2010. – P. 193–204. – DOI 10.2495/CR100191.

29 An improved multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization for railway freight

20 Intellectualization of transport services for metallurgical enterprises / A. N. Rakhmangulov, N. A. Osintsev, P. N. Mishkurov, O. A. Kopylova // Stal. – 2014. – No. 4. – P. 115–118. – DOI 10.6084/m9.figshare.14134226.v1.

21 **Karelin, V. P.** Models and methods of graph theory in decision support systems / V. P. Karelin // Bulletin of the Taganrog Institute of Management and Economics. – 2014. – No. 2 (20). – P. 69–73. – ISSN 2071-9604.

22 **Rakhmangulov, A.** Spatio-temporal graphs in transportation : challenges, optimization, and prospects / A. Rakhmangulov, N. Osintsev, P. Mishkurov // Systems. – 2025. – Vol. 13, No. 4. – P. 263. – DOI 10.3390/systems13040263.

23 **Ahuja, R.** Network flows : theory, algorithms, and applications / R. Ahuja, T. Magnanti, J. Orlin // Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1993. – 840 p. – ISBN 0-13-617549-X.

24 **El-Sherbeny, N. A.** The algorithm of the time-dependent shortest path problem with time windows / N. A. El-Sherbeny // Applied Mathematics. – 2014. – No. 5 (17). – P. 2764–2770. – DOI 10.4236/am.2014.517264.

25 **Mishkurov, P. N.** Methodology of forming a transport network of railway stations / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov, O. V. Fridrikhson // Bulletin of the Ural State University of Railway Transport. – 2021. – No. 3 (51). – P. 50–64. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64.

26 **Völz, W. D.** Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie / W. D. Völz // Vorträge der Jahrestagung 1977 / Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR. Physica-Verlag HD, 1978. – P. 440–449.

27 **Montigel, M.** Formal representation of track topologies by double vertex graphs / M. Montigel // Computers in Railways III : Proceedings of the Third International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Comprail 92) / edited by T. K. Murthy. – Washington, DC, U.S.A. : WIT Press, 1992. – P. 359–370.

28 A multi scalable model based on a connexity graph representation / L. Gély, G. Dessagne, P. Pesneau, F. Vanderbeck // COMPRAIL 2010 / edited by B. Ning, C. A. Brebbia : WIT Transactions on The Built Environment. – Beijing, China : WIT Press Southampton, UK, 2010. – P. 193–204. – DOI 10.2495/CR100191.

29 An improved multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization for railway

transportation routing design / Q. Zhang, S. Liu, D. Gong, H. Zhang // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 157353–157362. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2948197.

30 **Осинцев, Н. А.** Мультикритериальные методы принятия решений на транспорте и в логистике / Н. А. Осинцев // Транспорт Урала. – 2021. – № 4 (71). – С. 3–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

31 **Козлов, П. А.** Метод динамического согласования производства и транспорта / П. А. Козлов, С. П. Миловидов // Сборник трудов Института комплексных транспортных проблем. Выпуск 105. – Москва, 1985. – С. 156–163.

32 **Мишкuroв, П. Н.** Динамическая оптимизация вагонопотоков / П. Н. Мишкuroв, А. Н. Рахмангулов. – Москва : Русайнс, 2017. – 110 с. – ISBN 978-5-4365-1820-6.

33 Нейро-нечеткое моделирование транспортно-логистических процессов / О. Н. Числов, Н. Н. Лябах, М. В. Бакалов [и др.] // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 10. – С. 23–27. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-10-4.

34 **Zhao, S.** An attention and wavelet based spatial-temporal graph neural network for traffic flow and speed prediction / S. Zhao, S. Xing, G. Mao // Mathematics. – 2022. – No. 19 (10). – P. 3507. – DOI 10.3390/math10193507.

35 **Jiang, W.** Graph Neural Network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – P. 117921. – ISSN 0957-4174.

36 **Мишкuroв, П. Н.** Метод представления управленческих решений в имитационных моделях железнодорожных станций / П. Н. Мишкuroв, А. Н. Рахмангулов // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–23 мая 2024 г. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 197–201.

37 **Tominac, P. A.** Spatio-temporal economic properties of multi-product supply chains / P. A. Tominac, W. Zhang, V. M. Zavala // Computers & Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 159. – Article no. 107666. – DOI 10.48550/arXiv.2106.13836.

38 **Jiang, W.** Graph neural network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – Article no. 117921 – DOI 10.48550/arXiv.2101.11174.

39 Multi-View Multi-Attention Graph Neural Network for Traffic Flow Forecasting / F. Wu,

freight transportation routing design / Q. Zhang, S. Liu, D. Gong, H. Zhang // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 157353–157362. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2948197.

30 **Osintsev, N. A.** Multicriteria methods of decision-making in transport and logistics / N. A. Osintsev // Transport of the Urals. – 2021. – No. 4 (71). – P. 3–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

31 **Kozlov, P. A.** A Method of dynamic coordination of production and transport / P. A. Kozlov, S. P. Milovidov // collection of works of the Institute of complex transport problems. Iss. 105. – Moscow, 1985. – P. 156–163.

32 **Mishkurov, P. N.** Dynamic optimization of carriage flows / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov. – Moscow : Rusains, 2017. – 110 p. – ISBN 978-5-4365-1820-6.

33 Neuro-fuzzy modeling of transport and logistics processes / O. N. Chislov, N. N. Lyabakh, M. V. Bakalov [et al.] // Transport : Science, Technology, Management. Scientific information collection. – 2022. – No. 10. – P. 23–27. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-10-4.

34 **Zhao, S.** An attention and wavelet based spatial-temporal graph neural network for traffic flow and speed prediction / S. Zhao, S. Xing, G. Mao // Mathematics. – 2022. – No. 19 (10). – P. 3507. – DOI 10.3390/math10193507.

35 **Jiang, W.** Graph Neural Network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – P. 117921. – ISSN 0957-4174.

36 **Mishkurov, P. N.** Method of presentation of management decisions in simulation models of railway stations / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov // Research and development of rail and road transport : collection of works of the International scientific and practical conference, Yekaterinburg, May 22–23, 2024. – Yekaterinburg : Ural State University of Railway Transport, 2024. – P. 197–201.

37 **Tominac, P. A.** Spatio-temporal economic properties of multi-product supply chains / P. A. Tominac, W. Zhang, V. M. Zavala // Computers & Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 159. – Article no. 107666. – DOI 10.48550/arXiv.2106.13836.

38 **Jiang, W.** Graph neural network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – Article no. 117921 – DOI 10.48550/arXiv.2101.11174.

39 Multi-View Multi-Attention Graph Neural Network for Traffic Flow Forecasting /

C. Zheng, C. Zhang [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – No. 2 (13). – P. 711. – DOI 10.3390/app13020711.

40 Трофимов, С. В. Научно-методические основы функционирования и развития промышленных транспортных систем : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.01 / Трофимов Сергей Владимирович. – Москва, 2004. – 245 с.

F. Wu, C. Zheng, C. Zhang [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – No. 2 (13). – P. 711. – DOI 10.3390/app13020711.

40 Trofimov, S. V. Scientific and methodological foundations of the functioning and development of industrial transport systems : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.22.01 / Trofimov Sergey Vladimirovich. – Moscow, 2004. – 245 p.

P. N. Mishkurov

THE CONCEPT OF SPATIAL-TEMPORAL OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES *

Abstract. The concept of spatial-temporal optimization of transport and logistics processes of industrial enterprises is proposed based on a combination of methods of multicriterial analysis, routing on specialized graphs of transport infrastructure, dynamic optimization on spatial-temporal graphs, simulation modeling and graph neural network. The combination of methods is necessary for forecasting and optimizing the parameters of transport and logistics processes in real time. The possibility of using the proposed combination of methods in the formation of optimal sequences of transport and logistics processes and synchronization of operational management of elements of the transport and logistics system of an industrial enterprise is shown. The developed approach will improve the efficiency of transport and logistics processes of industrial enterprises as a result of the integrated implementation of spatial-temporal optimization methods.

Keywords: transport and logistics process, spatial and temporal optimization, concept, combination of methods, industrial enterprise.

For citation: Mishkurov, P. N. The concept of spatial-temporal optimization of transport and logistics processes of industrial enterprises / P. N. Mishkurov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 219–230. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_219.

Сведения об авторах

Мишкурлов Павел Николаевич
Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова
(МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Information about the authors

Mishkurov Pavel Nikolaevich
Nosov Magnitogorsk State Technical University
(NMSTU),
Chair “Logistics and Transport Systems
Management”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru