

УДК 656.22

О. А. ТЕРЕЩЕНКО^{1*}

^{1*} Каф. «Управление эксплуатационной работой», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Республика Беларусь, тел. (0232) 95-21-84, ORCID 0000-0002-5598-9309

ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ МЕСТНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ И УЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Цель. Разработка метода оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов с использованием динамической модели перевозочного процесса, позволяющего с высокой степенью достоверности планировать образование местных поездов, показатели местной работы, необходимые производственные ресурсы для достижения намеченных показателей и предоставлять необходимые сведения в вышестоящие системы управления, производящие оперативное планирование перевозочного процесса на сетевом уровне. **Методика.** Решение задачи осуществлялось на подходах теории систем, методах теории множеств, теории управления, теории расписаний, теории вероятностей. Предложено определение динамической модели применительно к объекту и предмету исследования. Установлена роль и функции динамической модели при реализации управленческих процедур – планирования, регулирования и контроля перевозочного процесса. Определены требования к динамической модели, выполнение которых обеспечит доступность ее внедрения и необходимый уровень качества моделирования. Метод оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов разработан по индуктивной схеме за счет последовательного решения задач с поступательным расширением предметной области и объекта применения до достижения обозначенных в работе объекта и предмета исследования. **Результаты.** Разработанная динамическая модель перевозочного процесса нашла отражение при создании автоматизированной системы увязки состава образования с прогнозным графиком движения поездов на Белорусской железной дороге. Аналитически установлена гетероскедастичность остатков прогноза времени отправления поездов на дорожном полигоне при моделировании с использованием данной автоматизированной системы и горизонте оперативного планирования до 24 ч. Данный факт означает возможность эффективного использования разработанного метода для существенного повышения точности автоматизированного планирования. **Научная новизна.** Инновационная составляющая работы заключается в применении методов моделирования перевозочного процесса с одновременной оценкой технологических рисков, обусловленных точностью применяемой модели. При этом оценка рисков заложена в самой модели и постоянно учитывается во время моделирования с целью анализа возможных вариантов развития перевозочного процесса на железнодорожных участках и в узлах при оперативном планировании местной работы. **Практическая значимость.** Практическая ориентированность результатов работы имеет три основных составляющих: динамическая модель и предложенный метод адаптированы к существующим на железнодорожном транспорте условиям, что позволяет их совместную реализацию на базе эксплуатируемых информационно-аналитических систем управления перевозочным процессом; полученные научные и практические решения позволяют увеличить достоверность результатов оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов, что положительно отразится на показателях эксплуатационной работы и общем состоянии финансово-экономической деятельности железной дороги; предложенный метод позволяет масштабировать объекты и задачи оперативного планирования, доступен для использования в смежных областях оперативного планирования перевозок и, прежде всего, для решения актуальных задач поездообразования.

Ключевые слова: местная работа, оперативное планирование, динамическая модель, технологические риски, автоматизация.

Введение

Железнодорожный транспорт Республики Беларусь имеет устойчивое положение на рынке транспортных услуг. Продолжается активная интеграция в евроазиатские транспортные системы, имеются позитивные тенденции для увеличения транспортной работы. При этом

происходят процессы колебания и перераспределения эксплуатационной нагрузки между объектами железнодорожной инфраструктуры, связанные с сезонностью перевозок отдельных категорий грузов, наличием большого числа разовых отправок, логистической связью между системой управления грузовыми потоками и технологией работы смежных видов транспор-

та, грузовых терминалов, предприятий.

В структуре оборота вагона относящиеся к местной работе операции, как правило, сопоставимы или превосходят суммарную продолжительность всех остальных операций перевозочного процесса. На Белорусской железной дороге в последнее десятилетие наблюдается тенденция к увеличению удельного веса этого показателя, что обусловлено увеличением числа собственников эксплуатируемых вагонов, проведением мероприятий по экономии производственных ресурсов, присутствием экономической заинтересованности увеличения простоя вагонов на балансе клиентов (для недефицитного подвижного состава).

Оперативное планирование является одной из функций оперативного управления [1]. Основными задачами оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов являются:

- планирование процесса образования местных поездов на технических станциях;
- планирование операций с местными вагонами на промежуточных станциях;
- планирование процесса продвижения местных поездов;
- планирование мероприятий по обеспечению перевозок производственными ресурсами.

Комплексная оптимизация выполнения перечисленных задач существенно влияет как на продолжительность оборота вагонов, приходящуюся на операции в районе местной работы, так и на затраты, связанные с ресурсообеспечением рассматриваемого технологического процесса, что, в свою очередь, влияет на показатели финансово-экономической деятельности железной дороги [2, 3].

Применяемые в статье подходы предусматривают решение задач оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов в реальном масштабе времени на основе динамической модели перевозочного процесса с использованием методов оценки технологических рисков, обусловленных отклонениями автоматизированных прогнозов состояния перевозочного процесса от действительности.

Цель

Разработка метода оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов с использованием динамической модели перевозочного процесса, позволяющего с высокой степенью достоверности планировать образование местных поездов, пока-

затели местной работы, потребные производственные ресурсы для достижения намеченных показателей и предоставлять необходимые сведения в вышестоящие системы управления, производящие оперативное планирование перевозочного процесса на сетевом уровне.

Методика

1) Динамическая модель перевозочного процесса. Под динамическими моделями понимают теоретические конструкции, описывающие изменение (динамику) состояний исследуемого объекта. В данной работе, с учетом специфики решаемых задач, под динамической моделью $W(t)$ понимается совокупность изменяемых во времени объектов и их свойств, позволяющих на основе формальных правил, описывающих взаимодействие объектов модели, прогнозировать состояние перевозочного процесса.

Необходимым условием для формирования динамической модели перевозочного процесса является наличие массива информации, отображающей последовательное изменение состояния перевозочного процесса при условии, что достоверность и своевременность предоставления такой информации обеспечивает заданную надежность моделирования [4]:

$$p(W(t)) = p_6(W(t))p_{cb}(W(t)) \geq 1 - \varepsilon_m, \quad (1)$$

где $p_6(W(t))$ – вероятность автоматизированного решения моделируемой задачи с допустимой точностью;

$p_{cb}(W(t))$ – вероятность автоматизированного решения моделируемой задачи за время, не превышающее допустимое;

ε_m – максимально допустимый уровень погрешности моделирования.

Динамическую модель перевозочного процесса составляют два вида информации [5, 6]:

– условно постоянная информация, включающая информационную модель железнодорожной инфраструктуры и взаимосвязанных объектов, нормативно-справочную информацию и формализованное математическое обеспечение функционирования модели;

– переменная информация, включающая отображение состояния динамических объектов железнодорожного транспорта с целью вычисления (прогнозирования) перспективных состояний перевозочного процесса для использования полученных результатов в качестве исход-

ных данных в системе оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов.

Взаимосвязь управленческих процедур при использовании динамической модели перевозочного процесса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Динамическая модель в структуре управления перевозочным процессом

Применение динамической модели перевозочного процесса должно обеспечивать:

- прогнозирование с заданной точностью состояния местной работы железнодорожных участков и узлов;
- установление нормативов перевозочного процесса на основе результатов моделирования;
- универсальность используемых подходов для моделирования состояний технологических процессов, связанных с местной работой, для различных железнодорожных участков и узлов;
- возможность автоматизированной реализации разработанных алгоритмов в процессе оперативного планирования;
- возможность адаптации автоматизированных решений в применяемых на железнодорожном транспорте информационных системах при максимальном использовании существующих баз данных, программных и аппаратных средств.

Концептуально динамическая модель перевозочного процесса, предназначенная для решения задачи оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Концепция динамической модели перевозочного процесса

Объектами динамической модели перевозочного процесса $W(t)$ являются (рис. 3):

- объекты инфраструктуры W_s : перегоны (участки), станции (и их подсистемы, включая грузовые пункты). Данные объекты выступают параметрами при структурировании динамической базы данных $W_б$, а также являются исходными данными в процессе расчета прогноза $W_п$ [7];
- динамические объекты $W_d(t)$: вагонный парк, локомотивный парк, объекты технологического обеспечения перевозочного процесса. Объекты данного типа являются параметрами при расчете прогнозного состояния перевозочного процесса $W_п$ [8].



Рис. 3. Структурирование объектов динамической модели перевозочного процесса

Приведенное формализованное описание объектов модели позволяет широко использовать математические подходы и методы для решения задачи прогнозирования состояния перевозочного процесса в заданном периоде оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов.

2) Метод оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов. Обработка вагонопотока при его продвижении осуществляется посредством выполнения технологических операций, которые имеют следующие детерминированные (с определенным допущением) или вероятностные характеристики [9, 10]:

- расположение в технологической цепи по отношению к предыдущей и (или) последующей операции;
 - время начала выполнения операции по отношению ко времени завершения предыдущей операции;
 - продолжительность выполнения операции.
- Эти характеристики обусловлены:
- установленной технологией обработки вагонопотока;
 - оперативным регулированием перевозочного процесса;
 - интенсивностью и структурой вагонопотока;
 - развитием железнодорожной инфраструктуры;
 - средствами технического обеспечения перевозочного процесса.

Полный перечень выполняемых с вагоном операций перевозочного процесса, необходимый для формирования решения поставленной задачи, описывается множеством:

$$O_B = \bigcup_{i=1}^{n_{пер}} o_{Bi} = \left\{ \bigcup_{j=1}^{n_{пер}^T} o_{Bj}^T, \bigcup_{k=1}^{n_{пер}^M} o_{Bk}^M \right\}, \quad (2)$$

где o_{Bi} – операция перевозочного процесса;

$n_{пер}$ – общее количество операций перевозочного процесса, выполняемых с вагоном от момента появления вагона в зоне оперативной информации, до завершения с ним операций на расчетном железнодорожном участке или в узле, $n_{пер} = n_{пер}^T + n_{пер}^M$;

o_{Bj}^T – операция перевозочного процесса, выполняемая с вагоном на участке приближения (транзитное следование вагона на расчетный железнодорожный участок или в узел);

$n_{пер}^T$ – общее количество операций перевозочного процесса, выполняемых с вагоном на участке приближения;

o_{Bk}^M – операция перевозочного процесса, выполняемая с вагоном на расчетном железнодорожном участке или в узле;

$n_{пер}^M$ – общее количество операций пере-

возочного процесса, выполняемых с вагоном на расчетном железнодорожном участке или в узле.

С каждым конкретным вагоном в зависимости от его транспортных параметров, установленной технологии перевозок, характеристики железнодорожной инфраструктуры и общих параметров состояния перевозочного процесса выполняется определенное подмножество операций O_{Bi} из множества O_B :

$$O_{Bi} = \left\{ o_{Bj}^T \in O_{Bi} \mid P_B^T(o_{Bj}^T) \wedge o_{Bk}^M \in O_{Bi} \mid P_B^M(o_{Bk}^M) \right\}, \quad (3)$$

где P_B^T, P_B^M – установленные действующим технологическим процессом функции выбора последовательности выполняемых операций с вагоном, соответственно, на участке приближения и на расчетном железнодорожном участке или в узле.

Процесс автоматизированного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов предлагается реализовывать на стыке двух моделей:

1) расчета показателей прибытия вагонов на техническую станцию, обслуживающую местную работу на исследуемом полигоне, – то есть установления параметров поступления вагонов из-за пределов расчетного железнодорожного участка или узла;

2) работы грузовых фронтов на исследуемом полигоне.

Модель продвижения вагонопотока на железнодорожных участках и в узлах для решения задачи автоматизированного оперативного планирования местной работы можно представить, объединив последовательно идущие операции в характерные группы (рис. 4).

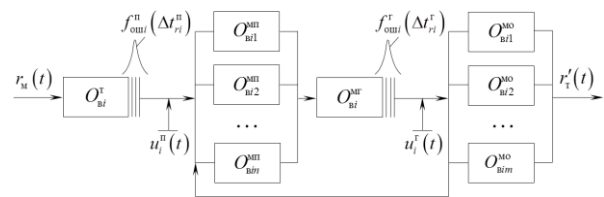


Рис. 4. Модель продвижения вагонопотока для решения задачи автоматизированного оперативного планирования местной работы

На рис. 4 использованы следующие обозначения:

O_{Bi}^T – совокупность операций, выполняемых с вагоном в зоне оперативной информации;

$O_{Bin}^{оп}$ – совокупность операций, выполняемых с вагоном от момента прибытия на техни-

ческую станцию расчетного железнодорожного участка (узла) до момента начала выполнения комплекса погрузочно-разгрузочных операций, а также операций, связанных с перемещением вагона под сдвоенную грузовую операцию или под грузовую операцию в случае, если вагон погружен назначением на одну из станций расчетного полигона или отправлен туда по регулировочному заданию;

$O_{vi}^{MГ}$ – совокупность операций, связанных с погрузкой и выгрузкой вагона;

O_{vim}^{MO} – совокупность операций, выполняемых с вагоном от момента завершения грузовых операций до его отправления в качестве транзитного вагона с расчетного железнодорожного участка (узла), за исключением операций, входящих в состав $O_{vin}^{MП}$;

$f_{оши}^n(\Delta t_{ri}^n)$ – функция плотности распределения остатков (ошибок прогнозирования) согласно результатам работы модели прибытия вагона на техническую станцию;

$f_{оши}^r(\Delta t_{ri}^r)$ – функция плотности распределения остатков согласно результатам моделирования продолжительности выполнения грузовых операций;

t_{ri}^n, t_{ri}^r – прогноз времени, соответственно, прибытия вагонов на техническую станцию и завершения с вагоном комплекса грузовых операций;

$u_i^n(t), u_i^r(t)$ – управляющие воздействия (регулирование перевозочного процесса), элементы общей функции управления $u(t)$.

Результатом моделирования продвижения вагонопотока является оперативный прогноз O_B^n , представленный в виде множества:

$$O_B^n = \bigcup_{i=1}^{n_{пер}} \bigcup_{j=1}^{n_{вар}} O_{vij}, \quad (4)$$

где $n_{вар}$ – количество вариантов технологических цепей, возникновение которых обусловлено характеристиками функций распределения $f_{оши}^n(\Delta t_{ri}^n), f_{оши}^r(\Delta t_{ri}^r)$ для i -го вагона;

O_{vij} – j -ая технологическая цепь для i -го вагона.

Каждой технологической цепи O_{vij} возможно поставить в соответствие вероятность ее реализации p_{vij} , вычисляемую по известным

$f_{оши}^n(\Delta t_{ri}^n), f_{оши}^r(\Delta t_{ri}^r)$ с учетом нормировки суммарной вероятности для i -го вагона по всем технологическим цепям до единицы.

Совместное продвижение вагонов на расчетном полигоне обуславливает динамическую загрузку его подсистем, то есть непосредственно формирует переменные рабочие параметры системы массового обслуживания [11]. Для оценки состояния объектов моделирования операции перевозочного процесса по способу обслуживания вагонопотока (заявок в системе массового обслуживания) разделены на две группы:

1) выполняемые по готовности, то есть обрабатываемые вагонопоток по мере его поступления в канал обслуживания с учетом свободности рабочих ресурсов;

2) выполняемые по расписанию (в том числе диспетчерскому).

Как правило, цепи операций, выполняемых по готовности, при обработке местного вагонопотока разделяются отдельными операциями с установленным расписанием: подачей вагонов на выставочные пути или к грузовым фронтам, уборкой вагонов с выставочных путей или грузовых фронтов, отправлением местного поезда, прицепкой (отцепкой) вагонов к прибывшему местному поезду.

Оценку общей продолжительности обработки местного вагона на исследуемом железнодорожном участке или в узле можно представить в виде:

$$t(O_{vi}^M) = \sum_{j=1}^{n_{пер}^M} t_{обсj}^M + \sum_{k=1}^{n_{расп}^M} t_{ожk}^M, \quad (5)$$

где $t_{обсj}^M$ – продолжительность выполнения операции технологического процесса обработки местного вагона;

$n_{расп}^M$ – количество операций технологического процесса, выполняемых по расписанию;

$t_{ожk}^M$ – ожидание операции технологического процесса, выполняемой по расписанию, после выполнения предшествующей операции.

Прогноз продвижения i -го вагона по технологической цепи на расчетном полигоне зависит от следующих групп факторов:

1-ая группа:

– нормативное время обработки в каждой подсистеме;

– способ использования производственных ресурсов, обеспечивающих обработку и продвижение вагонопотока;

– количественные характеристики и структура обрабатываемого вагонопотока (эксплуатационная нагрузка);

– установленное расписание выполнения выделенных операций;

2-ая группа:

– прогноз поступления вагона на расчетный полигон;

– прогноз завершения выполнения с вагоном комплекса грузовых операций.

Факторы первой группы имеют природу констант, напрямую зависят от управления или их воздействие корректируется управлением. То есть по результатам моделирования возможно запланировать изменение количества и способов применения производственных ресурсов, произвести корректировку расписания выделенных операций с целью достижения необходимых параметров эксплуатационной работы. При этом воздействие случайных факторов нивелируется возможностью комплексной подготовки превентивных мер, максимальным уровнем наблюдаемости и управляемости перевозочным процессом на расчетном полигоне в сравнении с другими объектам, находящимся в зоне информации.

Факторы второй группы имеют в своей основе фундаментальную неопределенность:

– время поступления вагона на расчетный полигон в общем виде зависит от внешнего управления (в том числе от действий иностранных железнодорожных администраций, операторов подвижного состава, перевозчиков, грузоотправителей); энтропии в системе выполнения комплекса грузовых операций с вагонами в адрес станций расчетного полигона; случайных событий (поломок подвижного состава, нерегламентированных задержек, ограничений и запрещений, человеческого фактора в системе управления);

– время завершения выполнения с вагоном комплекса грузовых операций (включая места общего пользования, но в меньшей степени) зависит от управления, целей, задач и критериев эффективности работы клиента, что способствует снижению уровня наблюдаемости и управляемости исследуемых процессов.

Как результат, в подсистеме оперативного прогнозирования выделяются два направления (рис. 5):

1) прогнозирование продвижения вагонопотока в технологических цепях, состоящих из операций, выполняемых по готовности и заключенных между двумя соседними уровнями расписания ($j, j+1$);

2) прогнозирование состояния уровней расписания в зависимости от заполнения ниток расписания (попадания на нитки расписания) подвижным составом.

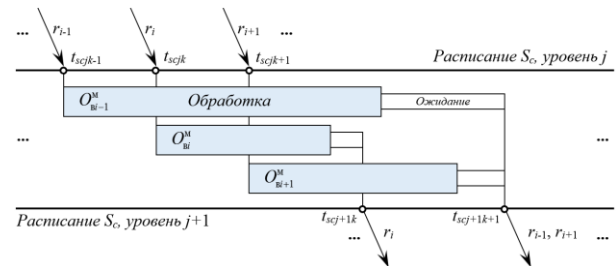


Рис. 5. Оперативное прогнозирование обработки вагонов и их продвижения между уровнями расписания

Расписанием S_c для всех установленных графиком (диспетчером, планом) операций, выполняемых на расчетном полигоне, является множество вида:

$$S_c = \bigcup_{j=1}^{k_{sc}} s_{cj}, \forall s_{cj} = \{t_{scj1}, t_{scj2}, \dots, t_{scjk}, P_{scj}\}, \quad (6)$$

где k_{sc} – количество уровней расписания, которое соответствует числу операций в технологической цепи, выполнение которых предусмотрено в установленное время;

s_{cj} – уровень расписания, представляющий собой перечень возможных временных координат для начала выполнения j -ой операции (например, график отправления местных поездов);

t_{scjk} – k -ая нитка j -го уровня расписания, то есть установленный расписанием момент времени возможного начала выполнения операции;

P_{scj} – установленная действующим технологическим процессом функция выбора, предписывающая возможность использования нитки расписания для обработки вагона, $E(P_{scj}) = \{0, 1\}$.

Функция выбора P_{scj} является вложенной функцией для P_B^M и ее значение определяется:

– параметрами вагона (технические характеристики, технологическое состояние, собственник);

– соответствием перечня произведенных с вагоном операций допустимому (наличие или отсутствие в перечне погрузки, выгрузки, промывки, очистки, установленных технических

или коммерческих неисправностей, необходимых финансовых операций).

Каждую нитку расписания возможно представить в виде нечеткого множества из числа готовых к обработке вагонов (рис. 6) и набора технических и технологических ограничений:

$$t_{scjk} = \left\{ r_i / p_{scjki} \mid P_{scj} = 1 \right\} : \forall t_{scjk}, \exists B_{scjk} = \{ b_{scjki} \}, \quad (7)$$

где p_{scjki} – мера (вероятность) принадлежности элемента r_i нечеткому множеству t_{scjk} ;

B_{scjk} – множество из $\{ b_{scjki} \}$ элементов, задающих параметры технических ограничений, накладываемых на k -ую нитку j -го уровня расписания.

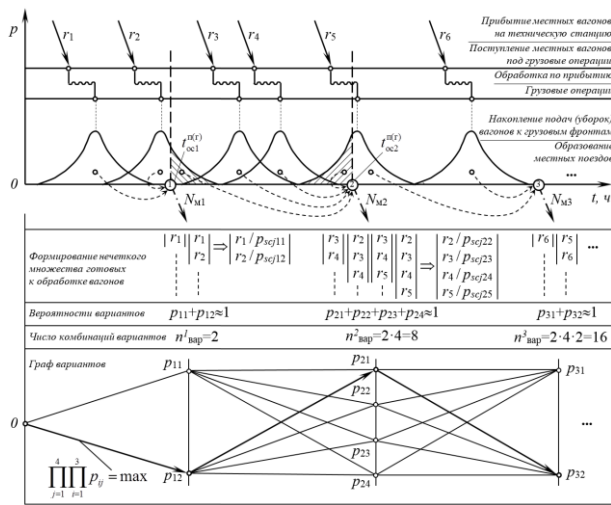


Рис. 6. Принцип формирования нечеткого множества готовых к обработке вагонов и прогнозирования вариантов развития технологического процесса

Техническими ограничениями в рассматриваемой модели выступают:

b_{scjk1} – допустимая длина железнодорожного состава или группы подаваемых (убираемых, выставляемых) вагонов;

b_{scjk2} – допустимая масса железнодорожного состава или группы подаваемых (убираемых, выставляемых) вагонов.

В общем виде технические ограничения b_{scjk1} , b_{scjk2} являются переменными величинами, так как технологический процесс может предусматривать различные варианты тягового обеспечения рассматриваемых процессов.

Для решения задач оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов производится анализ множества t_{scjk} :

1) Вычисляется математическое ожидание числа вагонов, готовых к выполнению операции по k -ой нитке j -го уровня расписания:

$$R_{scjk}^M = \sum_{i=1}^{r_{\text{нит}}} p_{scji}, \quad (8)$$

где $r_{\text{нит}}$ – общее число вагонов, для которых вероятность готовности к выполнению операции по k -ой нитке j -го уровня расписания $p_{scji} > 0$.

Прогноз параметра R_{scjk}^M является основой для составления базового варианта оперативного плана (то есть для средних условий).

2) Устанавливается множество (перечень номеров) вагонов, продвижение которых наиболее вероятно по k -ой нитке j -го уровня расписания:

$$R_{scjk}^B = \bigcup_{i=1}^{r_{\text{max}}} \left(r_i \mid \forall p_{scjki} = \max_{k=1}^{k_{ij}} p_{scjki} \right), \quad (9)$$

где r_{max} – количество вагонов, для которых вероятность готовности к обработке по k -ой нитке j -го уровня расписания максимальна;

k_{ij} – количество ниток расписания на j -ом уровне.

На основании множества R_{scjk}^B моделируются наиболее вероятные сценарии продвижения и обработки вагонопотока [12, 13, 14]. Также прогноз элементов множества R_{scjk}^B для лица, принимающего решение, является одной из оценок возможного отклонения готовых к обработке вагонов от среднего значения.

3) Устанавливается множество (перечень номеров) вагонов, продвижение которых по k -ой нитке j -го уровня расписания имеет вероятность более 0,5:

$$R_{scjk}^{0,5} = \bigcup_{i=1}^{r_{\text{max}}} \left(r_i \mid \forall p_{scjki} > 0,5 \right), \quad (10)$$

В процессе оперативного планирования прогноз элементов множества $R_{scjk}^{0,5}$ является оценкой величины и степени устойчивости ядра k -ой нитки.

4) Рассчитывается вероятность превышения технических ограничений p_{scjk}^b по k -ой нитке j -го уровня расписания:

$$\exists n_{\text{нит}} > \left[f_{re}(b_{scjkn}) \right] \Rightarrow p_{scjk}^b = \sum_{i=1}^{n_p^b} p_{scjki}^{pq}, \quad (11)$$

где f_{re} – функция, устанавливающая технические ограничения для групп вагонов и составов в физических вагонах на основе ограничений по длине b_{scjk1} и массе b_{scjk2} ;

n_p^b – количество вариантов комбинаторных сочетаний (произведений вариантов из вероятностей прямых и обратных событий) из общего числа $n_p = 2^{n_{\text{нит}}}$, для которых количество вероятностей прямых событий превышает $f_{re}(b_{scjkn})$, то есть для которых число готовых к обработке вагонов превышает допустимую величину;

p_{scjki}^{pq} – вероятность реализации i -го сочетания из вероятностей прямых и обратных событий, для которого число готовых к обработке вагонов превышает допустимую величину.

Современные высокопроизводительные серверные вычислительные платформы имеют производительность $\approx 10^{15}$ флопс, что позволяет автоматизировано вычислять искомую вероятность p_{scjk}^b за приемлемое время при $n_{\text{нит}}$ не более $\approx 3 \times 10^1$. При бóльших значениях $n_{\text{нит}}$ для оценки p_{scjk}^b возможно использовать аппроксимацию нормального распределения, с математическим ожиданием $\sum_{i=1}^{r_{\text{нит}}} p_{scji}$ и дисперсией

$$\frac{1}{r_{\text{нит}}} \sum_{i=1}^{r_{\text{нит}}} p_{scji} \sum_{i=1}^{r_{\text{нит}}} (1 - p_{scji}).$$

Вероятность превышения технических ограничений p_{scjk}^b по k -ой нитке j -го уровня расписания является мерой риска для рассматриваемой нитки, на основе которой принимаются решения о резервировании необходимых производственных ресурсов или пропускной способности элементов инфраструктуры.

Результаты

Разработанная динамическая модель перевозочного процесса нашла отражение при создании автоматизированной системы увязки составообразования с прогнозным графиком движения поездов (УСОГДП) на Белорусской железной дороге.

Аналитически установлена гетероскедастичность остатков прогноза времени от-

правления поездов на дорожном полигоне при моделировании с использованием УСОГДП и горизонте оперативного планирования до 24 ч. Данный факт означает возможность эффективного использования разработанного метода для существенного повышения точности оперативных планов, полученных с использованием УСОГДП.

Научная новизна и практическая значимость

Инновационная составляющая работы заключается в применении методов моделирования перевозочного процесса с одновременной оценкой технологических рисков, обусловленных точностью применяемой модели. При этом оценка рисков заложена в самой модели и постоянно учитывается во время моделирования с целью анализа возможных вариантов развития перевозочного процесса на железнодорожных участках и в узлах при оперативном планировании местной работы.

Практическая значимость работы имеет три основных направления:

1) динамическая модель и предложенный метод адаптированы к существующим на железнодорожном транспорте условиям;

2) полученные научные и практические решения позволяют увеличить достоверность результатов оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов;

3) предложенный метод позволяет масштабировать объекты и задачи оперативного планирования, доступен для использования в смежных подсистемах планирования и управления перевозками.

Вывод

Разработанная динамическая модель перевозочного процесса является базисом для комплексного автоматизированного планирования местной работы в реальном масштабе времени. Установленные условия формирования динамической модели и ее структура позволяют реализовать намеченные задачи на основе существующих на железнодорожном транспорте информационно-аналитических систем управления перевозочным процессом.

Представленный метод автоматизированного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов позволяет, кроме реализации своей непосредственной цели, также производить оценку технологических рисков, связанных с энтропией оперативного прогноза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гершвальд, А.С. Оптимизация оперативного управления процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте. / А. С. Гершвальд. – Москва : Интекст, 2001. – 240 с.
2. Вол, М. Анализ транспортных систем / М. Вол, Б. Мартин; под ред. И. А. Молодых. сокращ. пер. с англ. – Москва : Транспорт, 1981. – 516 с.
3. Кузнецов, В. Г. Комплексная система управления поездной работой на Белорусской железной дороге / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев // Проблемы и перспективы развития транспортный систем и строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2008. – С. 68-69.
4. Кузнецов, В. Г. Основы эргономики / В. Г. Кузнецов, О. А. Терещенко, Ю. О. Леинова // М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т. трансп. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 157 с.
5. Грунтов, П. С. Прогнозирование показателей работы сортировочных станций методом моделирования на ЭВМ / П. С. Грунтов, В. А. Захаров. – Гомель : БелИИЖТ, 1981. – 60 с.
6. Banks, J. Discrete-event system simulation. Second edition / Jerry Banks, John S. Carson, II; Barry L. Nelson. Published by Prentice Hall, 1996. – 594 p.
7. Казаков, Н. Н. Имитационное моделирование работы мультимодальной грузовой линии / Н.Н. Казаков, О.А. Терещенко // Наука и транспорт : Вестник Белорусского государственного университета транспорта. – Гомель: БелГУТ, 2008. – С. 38-43.
8. Терещенко, О. А. Математическая модель эксплуатационной нагрузки на железнодорожный полигон в районе местной работы / О. А. Терещенко // Transportas (Transport Engineering), Vol XIV– Vilnius:

О. А. ТЕРЕЩЕНКО

ОПЕРАТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ МІСЦЕВОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ ДІЛЬНИЦЬ І ВУЗЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ПЕРЕВІЗНОГО ПРОЦЕСУ

Мета. Розробка методу оперативного планування місцевої роботи залізничних дільниць та вузлів з використанням динамічної моделі перевізного процесу, що дозволяє з високим ступенем достовірності планувати утворення місцевих поїздів, показники місцевої роботи, потрібні виробничі ресурси для досягнення намічених показників та надавати необхідні відомості у вищестоящі системи управління, що здійснюють оперативне планування перевізного процесу на мережевому рівні. **Методика.** Рішення завдання здійснювалося на підходах теорії систем, методах теорії множин, теорії управління, теорії розкладів, теорії ймовірностей. Запропоновано визначення динамічної моделі стосовно до об'єкта і предмету дослідження. Встановлено роль і функції динамічної моделі при реалізації управлінських процедур – планування, регулювання і контролю перевізного процесу. Визначено вимоги до динамічної моделі, виконання яких забезпечить доступність її впровадження і необхідний рівень якості моделювання. Метод оперативного планування місцевої роботи залізничних дільниць та вузлів розроблений за індуктивної схемою за рахунок послідовного вирішення завдань з поступальним розширенням предметної області та об'єкта застосування до досягнення позначених у роботі об'єкта та предмета дослідження. **Результати.** Розроблена динамічна модель перевізного процесу знайшла відображення при створенні автоматизованої системи ув'язки составоутворення з прогнозним графіком руху поїздів на Білоруській залізниці. Аналітично встановлено гетероскедастичності залишків прогнозу часу відправлення поїздів на дорожньому полігоні при моделюванні з використанням даної автоматизованої системи та горизонті оперативного планування до 24 год. Даний факт означає можливість ефектив-

Technika, 2007. С. 80 – 73.

9. Долгополов, П. В. Удосконалення управління потоками у транспортному вузлі за допомогою апарату нечітких нейронних мереж / П. В. Долгополов, В. В. Петрушов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – Вип. 1. – С. 40-42.

10. Долгополов, П. В. Совершенствование местной работы железнодорожного узла на основе теории расписаний / П. В. Долгополов, О. О. Бовкун // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Вип. 2. – С. 30-32.

11. Kazakov, N. Imitating modeling groups of multimodal cargo lines with participation of a sailing charter. Transportas (Transport Engineering), Vol XIV, No 3, Vilnius: Technika, 2006. – P. 74-82.

12. Ерофеев, А. А. Управление процессами поездодообразования / А. А. Ерофеев // Сб. докл. 7-й конф. молодых ученых. – Вильнюс : Техника, 2004. – С. 336.

13. Грунтов, П. С. Информационно-технологический подход к системе поездодообразования / П. С. Грунтов, А. А. Ерофеев // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. II. – Гомель : БелГУТ, 2003. – С.17-19.

14. Гершвальд, А. С. Оптимизация оперативного управления процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте. / А. С. Гершвальд. – Москва : Интекст, 2001. – 240 с.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Бобровским В. И. (Украина)

Поступила в редколлегию 08.11.2016.

Принята к печати 12.11.2016.

ного використання розробленого методу для істотного підвищення точності автоматизованого планування. **Наукова новизна.** Інноваційна складова роботи полягає у застосуванні методів моделювання перевізного процесу з одночасною оцінкою технологічних ризиків, обумовлених точністю застосовуваної моделі. При цьому оцінка ризиків закладена у самій моделі та постійно враховується під час моделювання з метою аналізу можливих варіантів розвитку перевізного процесу на залізничних ділянках та у вузлах при оперативному плануванні місцевої роботи. **Практична значимість.** Практична орієнтованість результатів роботи має три основні складові: динамічна модель та запропонований метод адаптовані до існуючих на залізничному транспорті умов, що дозволяє їх спільну реалізацію на базі експлуатованих інформаційно-аналітичних систем управління перевізним процесом; отримані наукові та практичні рішення дозволяють збільшити достовірність результатів оперативного планування місцевої роботи залізничних дільниць та вузлів, що позитивно відобразиться на показниках експлуатаційної роботи та загальному стані фінансово-економічної діяльності залізниці; запропонований метод дозволяє масштабувати об'єкти та задачі оперативного планування, доступний для використання на суміжних областях оперативного планування перевезень та, перш за все, для вирішення актуальних завдань поездеотворення.

Ключові слова: місцева робота, оперативне планування, динамічна модель, технологічні ризики, автоматизація

O. TERESHCHENKO

OPERATIONAL PLANNING OF LOCAL WORK ORGANIZATION OF RAILWAY SECTION AND JUNCTION WITH USE OF DYNAMIC MODEL OF TRANSPORTATION PROCESS

Purpose. Development of a method of operational planning of local work of railway sections and units using a dynamic model of the transportation process, which allows a high degree of certainty to plan the formation of local trains, the performance of local work, the needs of production resources for the achievement of the indicators and provide the necessary information to higher-level control system, generating operational planning transportation process at the network level. **Methodology.** The solution was carried out on the approaches of systems theory, methods of set theory, control theory, scheduling theory, probability theory. A definition of the dynamic model in relation to the object and subject of research. The role and function of the dynamic model in the implementation of administrative procedures - planning, management and monitoring of the transportation process. The requirements for the dynamic model, the implementation of which will ensure the availability of its implementation and the necessary level of quality simulation. The method of operational planning of local work of railway sections and units designed for inductive circuit by sequential decision tasks with progressive expansion of the domain object, and the application to achieve the designated object and subject of study. **Findings.** Developed a dynamic model of the transportation process is reflected to create an automated system linking train formation forecast timetable of trains on the Belarusian Railways. Analytically set heteroskedasticity residues departure time of trains on the road forecast range in the simulation using this automated system and operational planning horizon to 24 hours. This fact indicates the possibility of the effective use of this method to significantly improve the accuracy of automated scheduling. **Originality.** An innovative component of the work is the use of simulation methods of transportation process with simultaneous assessment of the technological risks arising within the model used. This risk assessment is inherent in the model and are constantly taken into account in the simulation in order to analyze possible options for the development of the transportation process at railway stations and nodes in operational planning of local work. **Practical value.** The practical orientation of the results has three main components: a dynamic model and the proposed method is adapted to existing conditions in the railway sector, which allows them to joint implementation on the basis of information-analytical operated traffic control systems; obtained scientific and practical solutions to make it possible to increase the reliability of the results of operational planning of local work of railway sections and units that have a positive impact on the performance of operational work and the general state of the financial and economic activities of the railway; the proposed method makes it possible to scale the objects and purposes of operational planning, is available for use in transport related areas of operational planning and, above all, to address the actual problems of train formation.

Keywords: local work, operational planning, dynamic model, technological risks, automation.