

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МЕСТНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ И УЗЛОВ

Обоснована актуальность решаемой научной проблемы. Приведен способ формализации технологических процессов местной работы железнодорожных участков и узлов, основанный на системном представлении и алгоритмическом описании перевозочного процесса, позволяющий моделировать и устанавливать параметры технологических цепей продвижения местного вагонопотока произвольной структуры. Предложена методика оценки технологических рисков в задачах оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов, основанная на прогнозировании параметров технологических цепей, позволяющий снижать издержки, связанные с нарушением заданных параметров доставки грузов, использованием тягового подвижного состава, вагонного парка, трудовых ресурсов.

Эффективность транспортной деятельности зависит от адаптации технологии транспорта к возникающим потребностям транспортного рынка, условиям организации перевозок, используемым и внедряемым инновациям.

Планирование перевозочного процесса является сложной и наукоемкой составляющей транспортной деятельности. Качественное решение задач планирования основывается на моделях, позволяющих своевременно и достоверно прогнозировать поведение транспортных объектов, уменьшая энтропию в системе управления. За счет этого достигается снижение технологических рисков, обеспечивается рациональное использование производственных ресурсов, улучшаются количественные и качественные показатели.

Информационные технологии, применяемые на железнодорожном транспорте, создали виртуальную среду, динамично и адекватно отображающую перевозочный процесс. Ее наличие позволяет разрабатывать и реализовывать высокоточные алгоритмы прогнозирования перевозочного процесса, включая модели реального времени [1, 7].

Местная работа рассматривается преимущественно на линейном уровне управления – на железнодорожных станциях, участках и в узлах, которые представляют собой условно самостоятельные объекты, позволяющие в их совокупности рассматривать произвольный железнодорожный полигон.

Местная работа железной дороги является важной составляющей транспортной деятельности, обеспечивающей начально-конечную фазу перевозки грузов. Для нее характерны операции, параметры которых зависят от достаточно большого числа участников логистической цепи. Качество местной работы оказывает влияние на процессы накопления и формирования поездов, которые в свою очередь определяют основные параметры эксплуатационной работы станций и узлов, участков, отделений дороги, железной дороги в целом [3, 4, 6].

Решаемые в процессе организации местной работы задачи характеризуются многофакторностью и взаимной разнонаправленностью критериев, что обуславливает трудность их формализации. С учетом этого оперативное планирование местной работы в характерной для этой деятельности сложной производственной обстановке требует совершенствования научных подходов и методической базы, разработки и внедрения на их основе организационных, технологических и информационных решений.

Проведенные научным сообществом исследования позволили формализовать основные технологические процессы местной работы и условия взаимодействия. В то же время в рассматриваемой области остались нерешенными ряд задач. Одной из важнейших на сегодняшний день является проблема оптимизации ресурсов множества участников перевозочного процесса.

На стадии оперативного управления местной работой ресурсы оптимизируются и распределяются на этапе оперативного планирования. Качество системы оперативного планирования определяется уровнем адекватности параметров плановой модели фактическим результатам эксплуатационной работы при условии, что плановая модель соответствует заданным критериям оптимальности. Адекватность параметров плановой модели определяется качеством исходной информации и технологии (алгоритмов) планирования.

Качество исходной информации (ее содержательность, доступность, достаточность, репрезентативность, актуальность, своевременность, достоверность, точность, устойчивость) определяется методическим обеспечением и надежностью функционирования системы планирования. Качество технологии оперативного планирования во многом определяется способностью ее математического обеспечения использовать содержательный потенциал исходной информации [5].

С учетом структурной сложности объекта исследования, влияния на его функционирование множества факторов, в том числе случайных, на основе исходной информации не может быть однозначно предопределено развитие перевозочного процесса. Возможна лишь некоторая его сценарная оценка с той или иной вероятностью наступления [6].

Каждый сценарий перевозочного процесса включает в себе возможность свершения множества событий в управляемой системе, среди которых может быть ряд негативных: превышение нормативов в системе доставки груза, отсутствие необходимых людских и технических ресурсов для обеспечения ритмичной работы, заданных технологических параметров и др.

Перевозочный процесс не может осуществляться одновременно по нескольким сценариям, поэтому один из них, субъективно наиболее вероятный, на стадии осуществления прогноза принимается при дальнейшем планировании в качестве основного (базового). Для него разрабатываются регулировочные меры и

порядок ресурсообеспечения. При этом негативные события в управляемой системе, возможные в рамках множества альтернативных сценариев развития перевозочного процесса, могут быть учтены как риски применяемой технологии. Для оценки указанных рисков предлагается динамическая модель [2, 6], в основе которой лежит формализованное представление перевозочного процесса. В модели допустимое множество выполняемых с вагоном операций описывается выражением

$$O_B = \bigcup_{i=1}^{n_{\text{пер}}} O_{B_i} = \left\{ \bigcup_{j=1}^{n_{\text{пер}}^T} o_{B_j}^T, \bigcup_{k=1}^{n_{\text{пер}}^M} o_{B_k}^M \right\}, \quad (1)$$

где  $O_{B_i}$  – операция перевозочного процесса;  $n_{\text{пер}}$  – 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;  $o_{B_j}^T$  – операция перевозочного процесса, выполняемая с вагоном на участке приближения (транзитное следование вагона на расчетный железнодорожный участок или в узел);  $n_{\text{пер}}^T$  – общее количество операций перевозочного процесса, выполняемых с вагоном на участке приближения;  $o_{B_k}^M$  – операция перевозочного процесса, выполняемая с вагоном на расчетном железнодорожном участке или в узле;  $n_{\text{пер}}^M$  – общее количество операций перевозочного 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  $O_{B_i}$  из множества  $O_B$ :

$$O_{B_i} = \left\{ o_{B_j}^T \in O_{B_i} \mid P_B^T(o_{B_j}^T) \wedge o_{B_k}^M \in O_{B_i} \mid P_B^M(o_{B_k}^M) \right\}, \quad (2)$$

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.

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

$$O_B^n = \bigcup_{i=1}^{n_{\text{пер}}} \bigcup_{j=1}^{n_{\text{вар}}} O_{B_{ij}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{вар}}$  – количество вариантов технологических цепей (сценариев), возникших вследствие наличия неопределенности информации о состоянии перевозочного процесса в исходных данных модели для  $i$ -го вагона;  $O_{B_{ij}}$  –  $j$ -я технологическая цепь для  $i$ -го вагона.

Численный анализ характеристик неопределенности исходной информации и результирующих параметров

возникших технологических цепей является сутью процесса установления технологических рисков [5, 6].

Вероятность реализации технологической цепи для  $i$ -го вагона

$$p_i(r_i) = \prod_{j=1}^{n_i} p_j^k, \quad (4)$$

где  $n_i$  – число осей расчетного графа, представляющего варианты развития перевозочного процесса;  $p_j^k$  – вероятность реализации  $j$ -й стадии технологического процесса (группы операций) по  $k$ -му сценарию.

Каждому вагону согласно его технологическим признакам ставится в соответствие набор ограничений  $r_i \Leftrightarrow \{b_{oj}\}$  из общего множества  $B_0$ . Эти ограничения являются факторами технологического риска. Их различные виды могут оперативно устанавливаться в зависимости от сложившейся производственной ситуации. Общими для всех случаев следует считать ограничения:

$b_{o1}$  – допустимый срок доставки груза, учитываемый по времени подачи вагона к грузовому фронту или на выставочные пути;

$b_{o2}$  – допустимое время подачи порожнего вагона под погрузку, учитываемое по времени подачи вагона к грузовому фронту или на выставочные пути;

$b_{o3}$  – допустимое время нахождения вагона в определенной части технологической цепи или в целом на расчетном полигоне, определяемое установленными ограничениями на простой местного вагона или ограничениями по времени использования железной дороги вагонного парка, принадлежащего другим операторам.

Риск нарушения технологического ограничения для  $i$ -го вагона определяется совокупной вероятностью реализации технологических цепей, по которым это нарушение прогнозируется:

$$P_i^b = \sum_{l=1}^{n(b_{ij})} p_l(r_i), \quad (5)$$

где  $n(b_{ij})$  – количество вариантов технологических цепей для  $i$ -го вагона, по которым нарушается ограничение  $b_{oj}$ .

Численные значения вероятностей, расположенных на первой оси графа сценариев развития перевозочного процесса  $\{P_{oc11}, P_{oc12}, \dots, P_{oc1m_1}\}$ , устанавливаются на основе обнаруженных отклонений прогнозной модели прибытия вагонов на расчетный полигон. Значения вероятностей, расположенных на каждой последующей  $j$ -й оси графа, зависят от распределения вероятностей по вершинам предыдущей  $(j-1)$ -й оси графа. При этом установление линейных аналитических зависимостей для последовательного распределения вероятностей по вершинам графа представляется возможным только при низкой эксплуатационной нагрузке, при которой не возникают (или возникают незначительно) в подсистемах объекта исследования простои в очередях на обслуживание.

Приведенные условия не являются типичными для железнодорожного транспорта, поэтому для решения поставленной задачи в общем виде должны рассматри-

ваться условия совместного продвижения вагонов на расчетном полигоне. Общий вагонопоток обуславливает динамическую загрузку подсистем объекта исследования, то есть непосредственно формирует переменные рабочие параметры системы массового обслуживания.

Важным этапом оценки технологических рисков в

задачах оперативного планирования является установление источников энтропии исходной информации [5, 6], которая связана с неопределенностью состояния перевозочного процесса за счет влияния случайных факторов (рисунок 1).

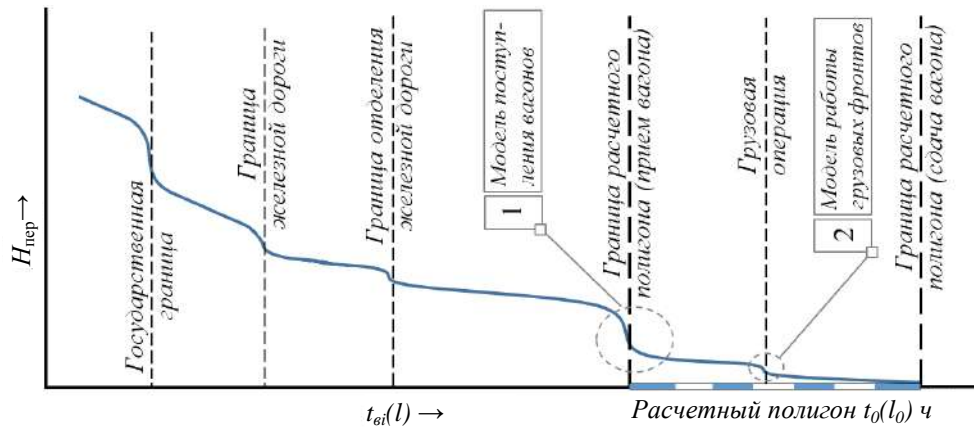


Рисунок 1 – Изменение энтропии перевозочного процесса при решении задач оперативного планирования

Для расчетного железнодорожного полигона источники энтропии исходной для планирования информации укрупненно можно представить в виде совокупности всех внешних по отношению к расчетному полигону факторов и основного внутреннего фактора – сложного управленческого взаимодействия железной дороги и клиентов в процессе выполнения погрузки и выгрузки, что затрудняет достоверное прогнозирование времени освобождения вагонов после завершения грузовых операций.

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте подчиняется законам сложных систем [1, 3]. Даже в условиях предоставления достоверных исходных данных на практике оказывается невозможным регулярно точное прогнозирование состояний перевозочного процесса из-за результирующего влияния множества малозначимых и случайных факторов, не нашедших по объективным причинам отражения в алгоритмах модели. При оперативном планировании для одновременного учета неопределенности исходной информации и качества работы прогнозной модели предлагается использовать статистическую оценку, основанную на функциях плотности распределения вероятности остатков времени (ошибок прогнозирования), которые определяются сравнением результатов оперативного прогноза моментов времени прибытия вагонов на техническую станцию  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$  и моментов времени завершения выполнения с вагонами грузовых операций  $f_{\text{оши}}^f(\Delta t_{ri}^f)$  с фактически исполненными значениями.

Функция плотности распределения остатков времени  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$  в зависимости от наличия резерва пропускной способности на примыкающем железнодорожном участке (насыщенности графика движения поездов) может быть аппроксимирована непрерывной функцией – при низком и среднем уровне использования пропускной способности, кусочно-заданной – при высоком уровне использования пропускной способности с большой долей пассажирских и других приоритетных поездов на графике, дискретной точечной – при полном использовании пропускной способности с большой долей пассажирских и других прио-

ритетных поездов на графике. Данный факт обусловлен степенью возможности регулировочной трансформации поездным диспетчером нормативного графика движения в зависимости от уровня его насыщенности. Аналогично, вид функции  $f_{\text{оши}}^f(\Delta t_{ri}^f)$  обусловлен уровнем загрузки и степенью соблюдения выполнения установленного расписания в подсистеме выполнения грузовых операций.

На рисунке 2 представлена гистограмма распределения статистических частот выборки отклонений прогнозной модели прибытия поездов на станцию Минск-Сортировочный (согласно сведениям УСОГДП) от факта.

В процессе исследования установлено распределение отклонений прогнозной модели прибытия поездов на станцию Минск-Сортировочный от факта по двухчасовым периодам вплоть до глубины 24 ч. Выбор интервалов моделирования обусловлен тем, что при их меньшем размере на практике сложно получить достаточный объем статистической выборки, а при больших значениях соседние интервалы попарно не удовлетворяют большинству общепринятых критериев проверки однородности выборок (в частности, критерию Колмогорова). Также установлены признаки гетероскедастичности общей выборки (в периоде 0,00–24,00 ч), которыми являются линейный тренд увеличения во времени математического ожидания и дисперсии величины  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$ .

Представленный на рисунке 2 анализ за счет наличия значимого числа статистических выбросов характеризует результаты моделирования прибытия вагонов УСОГДП как неоднородные. В основе присутствующей неоднородности главным образом лежат случайные факторы, связанные с процессами в системе управления, отказами технических устройств и появлением в модели поездообразования вагонов, не учитываемых на стадии формирования исходных данных. Следует отметить, что при совершенствовании моделей прогнозирования полная ликвидация указанных факторов в силу их природы не представляется возможной. А математическое описание законов распределения вероятностей от-

клонений прогнозных моделей от факта в таких случаях адекватно кусочно-заданным функциям.

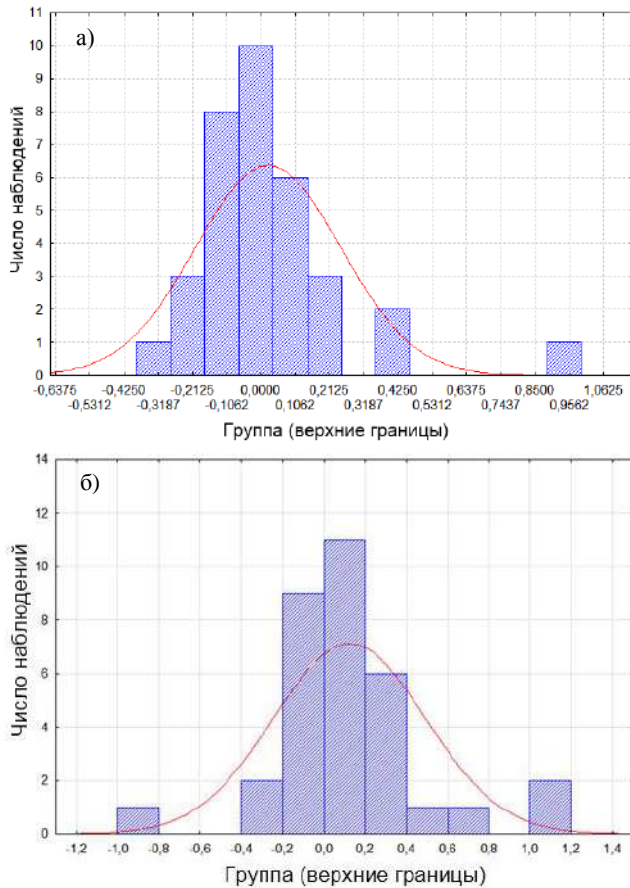


Рисунок 2 – Гистограмма распределения статистических частот выборки отклонений прогнозной модели прибытия поездов на станцию Минск-Сортировочный от факта при глубине прогноза:

$a$  – 0,00–1,99 ч;  $b$  – 2,00–3,99 ч

При планировании местной работы железнодорожных участков из узлов, кроме рисков нарушения технологических ограничений для вагонов, предлагается учитывать риски, связанные с превышением технических ограничений по длине и массе поездов и маневровых составов. Такие риски характеризуются вероятностью

$$P_r = \sum_{i=1}^{n_k} P_i^{pq}, \quad (6)$$

где  $n_k$  – количество вариантов комбинаторных сочетаний (произведений вариантов из вероятностей прямых и обратных событий) из общего числа, для которых число накопившихся вагонов или их общая масса превышают

допустимую величину;  $P_i^{pq}$  – вероятность реализации  $i$ -го сочетания из вероятностей прямых и обратных событий, для которого число накопившихся вагонов или их общая масса превышают допустимую величину.

При больших значениях  $n_k$  (30 и более) для оценки  $P_r$  с целью экономии вычислительных ресурсов возможно использовать аппроксимацию закона распределения рисков нормальным распределением вероятностей [6].

Предлагаемая методика оценки технологических рисков отвечает современным требованиям менеджмента и может быть внедрена в качестве методической основы в систему оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов. Разработанная методика имеет высокий потенциал адаптации и может быть использована при решении широкого спектра задач в области планирования транспортных процессов.

### Список литературы

- 1 Долгополов, П. В. Удосконалення управління потоками у транспортному вузлі за допомогою апарату нечітких нейронних мереж / П. В. Долгополов, В. В. Петрушов // Східноєвропейський журнал передових технологій. – Харків, 2009. Вип. 1. – С. 40–42.
- 2 Казаков, Н. Н. Имитационное моделирование работы мультимодальной грузовой линии / Н. Н. Казаков, О. А. Терещенко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2008. – № 2 (17). – С. 38–43.
- 3 Кузнецов, В. Г. Комплексный подход к информационным технологиям оперативного управления поездной работой на Белорусской железной дороге / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев, М. В. Федорцов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ – 2013) : Вторая науч.-техн. конф., 21–22 окт. 2013, г. Москва. – М. : ОАО «НИИАС», 2013. – С. 80–82.
- 4 Кузнецов, В. Г. Модель разработки заданий в суточном плане эксплуатационной работы Белорусской железной дороги / В. Г. Кузнецов, И. А. Войтехович, Т. В. Пильгун // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2010. – № 2 (21). – С. 51–56.
- 5 Терещенко, О. А. Моделирование процессов накопления вагонов для решения задач оперативного планирования в условиях неопределенности исходной информации / О. А. Терещенко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 45–55.
- 6 Терещенко, О. А. Оперативное планирование местной работы железнодорожных участков и узлов с использованием динамической модели перевозочного процесса / О. А. Терещенко // Транспортні системи та технології перевезень : збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – 2016. – № 12. – С. 80–89.
- 7 Robinson, C. J. Defining the concept of Supply Chain Quality Management and its relevant to academic and industrial practice / C. J. Robinson, M. K. Malhotra // International Journal of Production Economics. – 2005. – Vol. 96. – P. 315–337.

Получено 10.10.2017

**O. A. Tereshchenko.** Assessment of technological risks in the tasks of operational planning for local work of railway sections and nodes.

The urgency of the scientific problem being solved is substantiated. The method of formalized representation of technological processes of local operation for railway sections and nodes is presented. It is based on the system representation and algorithmic description of the transportation process, that allows to model and establish the parameters of technological chains of promotion of a local carload of an arbitrary structure. The method for assessing technological risks in the tasks of operational planning for local operations of railway sections and units based on the forecasting of parameters of technological chains is proposed. It allows reducing the costs associated with the violation of the specified parameters of cargo delivery, using traction rolling stock, carriage fleet, labor resources.