

УДК 656.22

О. А. ТЕРЕЩЕНКО, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МЕСТНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ И УЗЛОВ

Представлен метод оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов с использованием динамической модели перевозочного процесса, позволяющий с высокой достоверностью планировать образование местных поездов, показатели 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. Обоснованы применяемые подходы. Установлены аналитические зависимости. Решение задач исследования осуществлялось на подходах теории систем, методах теории множеств, теорий управления, расписаний, вероятностей. Представлены научные и практикоориентированные выводы.

Современные тенденции научных исследований в области планирования производственных и транспортных процессов в большинстве случаев направлены на повышение точности разрабатываемых планов за счет автоматизации решаемых задач, раскрытия и реализации возможностей доступных информационных технологий.

На Белорусской железной дороге оперативное планирование местной работы железнодорожных участков и узлов осуществляется автоматизированно в рамках сменно-суточного планирования поездной и грузовой работы.

Совершенствование оперативного планирования местной работы железнодорожных участков и узлов должно быть направлено на разработку и реализацию процедур, обеспечивающих оптимальный уровень детализации перевозочного процесса с учетом возможностей применяемых информационно-аналитических систем. Исходя из сказанного, оперативный план местной работы на рассматриваемом железнодорожном полигоне должен включать планы:

- 1) прибытия на обслуживающую техническую станцию груженых вагонов под выгрузку и порожних под погрузку по установленным классификационным признакам, включая разделение по периодам текущего планирования;
- 2) обслуживания пунктов местной работы, включая расписание подач и уборок вагонов;
- 3) отправления местных поездов;
- 4) погрузки вагонов по установленным классификационным признакам, включая разделение по периодам текущего планирования;
- 5) выгрузки вагонов по установленным классификационным признакам, включая разделение по периодам текущего планирования;
- 6) регулирования местных и порожних вагонопотоков;
- 7) ресурсообеспечения местной работы.

Обработка вагонопотока при его продвижении осуществляется посредством выполнения технологических операций, которые имеют следующие детерминированные (с определенным допущением) или вероятностные характеристики:

- 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:

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

где o_{Bi} – операция перевозочного процесса; $n_{\text{пер}}$ – общее количество операций перевозочного процесса, выполняемых с вагоном от момента появления его в зоне оперативной информации до завершения с ним операций на расчетном железнодорожном участке или в узле; o_{Bj}^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_{Bk}^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_{Bi} из множества O_B :

$$O_{Bi} = \left\{ o_{Bj}^T \in O_{Bi} \mid P_B^T(o_{Bj}^T) \wedge o_{Bk}^M \in O_{Bi} \mid P_B^M(o_{Bk}^M) \right\}, \quad (2)$$

где P_B^r, 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 (рисунок 1).

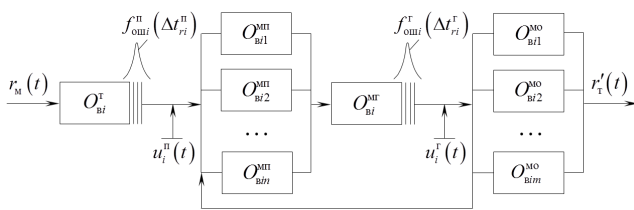


Рисунок 1 – Модель продвижения вагонопотока для решения задачи автоматизированного оперативного планирования местной работы

На рисунке 1 использованы следующие обозначения: $O_{B_i}^r$ – совокупность операций, выполняемых с вагоном в зоне оперативной информации; $O_{B_i}^{mp}$ – совокупность операций, выполняемых с вагоном от момента прибытия на техническую 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; $O_{B_i}^{mr}$ – совокупность операций, связанных с погрузкой и выгрузкой вагона; $O_{B_i}^{mo}$ – 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 $O_{B_i}^{mp}$; $f_{оши}^n(\Delta t_{ri}^n)$ – 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 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

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

где $n_{\text{вар}}$ – 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; $O_{B_{ij}}$ – j -я технологическая цепь для i -го вагона.

Каждой технологической цепи $O_{B_{ij}}$ возможно поставить в соответствие вероятность ее реализации $P_{B_{ij}}$, 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. 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 обрабатывающие 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

$$t(O_{B_i}^M) = \sum_{j=1}^{n_{\text{пер}}^M} t_{\text{обс}j}^M + \sum_{k=1}^{n_{\text{расп}}^M} t_{\text{ож}k}^M, \quad (4)$$

где $t_{\text{обс}j}^M$ – продолжительность выполнения операции технологического процесса обработки местного вагона; $n_{\text{расп}}^M$ – количество операций технологического процесса, выполняемых по расписанию; $t_{\text{ож}k}^M$ – ожидание операции технологического процесса, выполняемой по расписанию, после выполнения предшествующей операции.

Как результат, в подсистеме оперативного прогнозирования выделяются два направления (рисунок 2):

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.

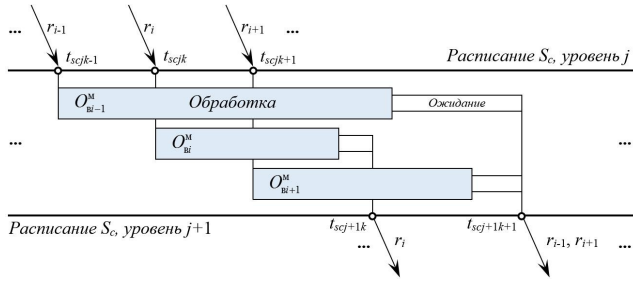


Рисунок 2 – Оперативное прогнозирование обработки вагонов и их продвижения между уровнями расписания

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

$$S_c = \bigcup_{j=1}^{k_{sc}} s_{cj}, \forall s_{cj} = \{t_{scj1}, t_{scj2}, \dots, t_{scjk}, P_{scj}\}, \quad (5)$$

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 -й операции (например, график отправления местных поездов); t_{scjk} – k -я 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_{scj}^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 и набора технических и технологических ограничений:

$$t_{scjk} = \{r_i / p_{scjki} \mid P_{scj} = 1\} : \forall t_{scjk}, \exists B_{scjk} = \{b_{scjkn}\}, \quad (6)$$

где p_{scjki} – мера (вероятность) принадлежности элемен-

та r_i нечеткому множеству t_{scjk} ; B_{scjk} – множество из $\{b_{scjkn}\}$ элементов, задающих параметры технических ограничений, накладываемых на k -ю нитку j -го уровня расписания.

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 -й нитке j -го уровня расписания:

$$R_{scjk}^M = \sum_{i=1}^{r_{нит}} p_{scji}, \quad (7)$$

где $r_{нит}$ – общее число вагонов, для которых вероятность готовности к выполнению операции по k -й 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 -й нитке j -го уровня расписания:

$$R_{scjk}^B = \bigcup_{i=1}^{r_{max}} \left(r_i \mid \forall p_{scjki} = \max_{k=1}^{k_{nj}} p_{scjki} \right), \quad (8)$$

где r_{max} – количество вагонов, для которых вероятность готовности к обработке по k -й нитке j -го уровня расписания максимальна; k_{nj} – количество ниток расписания на j -м уровне.

На основании множества R_{scjk}^B моделируются наиболее вероятные сценарии продвижения и обработки вагонопотока. 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 -й нитке j -го уровня расписания имеет вероятность более 0,5:

$$R_{scjk}^{0.5} = \bigcup_{i=1}^{r_{max}} (r_i \mid \forall p_{scjki} > 0,5), \quad (9)$$

В процессе оперативного планирования прогноз

элементов множества $R_{scjk}^{0.5}$ является оценкой величины и степени устойчивости ядра k -й нитки.

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

$$\exists n_{\text{нит}} > \left[f_{re}(b_{scjkn}) \right] \Rightarrow p_{scjk}^b = \sum_{i=1}^{n_p} p_{scjki}^{pq}, \quad (10)$$

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 $\sim 10^{15}$ флопс, что позволяет автоматизированно вычислять искомую вероятность p_{scjk}^b за приемлемое время при $n_{\text{нит}}$ не более $\sim 3 \cdot 10^1$. При больших значениях $n_{\text{нит}}$ для оценки p_{scjk}^b возможно использовать аппроксимацию нормального распределения, с математическим ожиданием $\sum_{i=1}^{n_{\text{нит}}} p_{scji}$ и дисперсией $\frac{1}{n_{\text{нит}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{нит}}} p_{scji} \sum_{i=1}^{n_{\text{нит}}} (1 - p_{scji})$.

Вероятность превышения технических ограничений p_{scjk}^b по k -й 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 работы имеет три основных составляющих: предложенный метод адаптированы к существующим на железнодорожном транспорте условиям, что позволяет их совместную реализацию на базе эксплуа-

тируемых 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 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.

Список литературы

- 1 СТП БЧ 09150.15.073-2008 «Порядок планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги, составления и контроля за выполнением суточных и сменных планов деятельности отделений дороги и станций». – Минск : Бел. ж. д., 2008. – 28 с.
- 2 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов / под ред. П. С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.
- 3 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.
- 4 Ерофеев, А. А. Управление процессами поездообразования / А. А. Ерофеев // Сб. докл. 7-й конф. молодых ученых. – Вильнюс : Техника, 2004. – С. 336.
- 5 Казаков, Н. Н. Имитационное моделирование работы мультимодальной грузовой линии / Н. Н. Казаков, О. А. Терещенко // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – Гомель: БелГУТ, 2008. – С. 38–43.
- 6 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 октября 2013, г. Москва. – М. : ОАО «НИИАС», 2013. – С. 80–82.
- 7 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.
- 8 Терещенко, О. А. Математическая модель эксплуатационной нагрузки на железнодорожный полигон в районе местной работы / О. А. Терещенко // Transportas (Transport Engineering), Vol XIV – Vilnius: Technika, 2007. С. 80–73.

Получено 12.12.2016

O. A. Tereshchenko. The method of operational planning of local work of railway sections and units using a dynamic model of the transportation process.

The method allows high reliability 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, which produce operational planning the transportation process at the network level. Substantiates the approaches. Analytical dependences. Research carried out on the solution of problems of systems theory approaches, methods of set theory, control theory, scheduling theory, probability theory. Presented scientific and practice-conclusions.