

В. Г. КУЗНЕЦОВ, О. Н. ЛИСОГУРСКИЙ (Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОДВИЖЕНИЯ ВАГОНОПОТОКОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ НОРМИРОВАНИИ

Сучасні тенденції в області управління на транспорті направлені на перехід від аналітичних систем обробки інформації до систем, що оброблюють інформацію та управляють, забезпечують підтримку ухвалення рішень в управлінні перевезеннями. Нові умови господарювання, з одного боку, і розвиток автоматизованих систем управління збору і обробки інформації про перевезення, з іншого боку, дозволяють вийти на принципово новий рівень планування показників роботи транспорту з розробкою нової методології рішення даних завдань. Одним з нових методів, що дозволяє вирішувати ряд експлуатаційних завдань, є створення динамічної моделі просування вагонопотоков. У статті наведений математичний опис полігону мережі і динамічної моделі. Дане поняття одиничного перевезення, наведена класифікація динамічних моделей залежно від вихідної інформації. Математичне опрацювання і алгоритм побудови динамічних моделей дає можливість їх застосування для рішення широкого кола завдань на транспорті.

Современные тенденции в области управления на транспорте направлены на переход от аналитических систем обработки информации к информационно-управляющим системам, обеспечивающим поддержку принятия решений в управлении перевозками. Новые условия хозяйствования, с одной стороны, и развитие автоматизированных систем сбора и обработки информации о перевозках, с другой стороны, позволяют выйти на принципиально новый уровень планирования показателей работы транспорта с разработкой новой методологии решения данных задач. Одним из новых методов, позволяющим решать ряд эксплуатационных задач, является создание динамической модели продвижения вагонопотоков. В статье приведено математическое описание полигона сети и динамической модели. Дано понятие единичной перевозки, приведена классификация динамических моделей в зависимости от исходной информации. Математическая проработка и алгоритм построения динамических моделей дает возможность их применения для решения широкого круга задач на транспорте.

Modern lines in the field of transport management are directed on transition from analytical systems of processing of information to the information-operating systems providing support of decision-making in management by transportations. New conditions of managing, on the one hand, and development of the automated systems of gathering and processing of information in transport industry, on the other hand, allows to reach essentially new level of planning the parameters of transport operation with development of new methodology of solution of the given problems. The creation of dynamic model of promotion of traffic volumes is one of the new methods that allows solving a number of operational problems.. In the paper the mathematical description of range of a network and dynamic model is given. The concept of individual transportation is presented, classification of dynamic models depending on the initial information is given. Mathematical study and algorithm of construction of dynamic models enables their applications for solution of wide range of problems on transport.

Современные изменения в структуре управления железнодорожным транспортом, учете и использовании вагонного парка, развитие автоматизированных систем управления требует ухода от исторически сложившихся стандартных методов планирования перевозочной деятельности и создания новой методологии технического нормирования работы дороги. Существующие методы планирования продвижения вагонопотоков, разработанные в восьмидесятые годы прошлого столетия, не отражают существующих тенденций в организации перевозок – разделении всей сети на железнодорожные администрации-собственники вагонных парков, возможности выбора клиентом маршрута следования его груза и др. Одним из новых мето-

дов является разработка и использование для решения эксплуатационных задач динамической модели работы дороги (далее динамической модели).

Применение динамической модели при организации планирования перевозок на краткосрочный и среднесрочный периоды позволяет: повысить эффективность регулирования вагонных парков между отделениями дороги и выделенными станциями по роду, по собственникам и по принадлежности подвижного состава, в зависимости от перевозимых грузов, и максимального использования грузоподъемности и вместимости вагонов; обеспечить выбор наиболее рационального направления следования грузеного и порожнего вагонопотоков с уче-

том принадлежности вагонов различным собственникам; устанавливать обоснованные нормы эксплуатируемого парка локомотивов в соответствии с плановыми объемами работы; отслеживать вагонопотоки различных категорий для оценки и прогнозирования управляющих воздействий на транспортную систему, разработки и корректировки графика движения и плана формирования поездов.

Наиболее формализованный подход к описанию процесса перевозки в классической литературе [3, 4] относится к рассмотрению процесса перевозок между двумя пунктами. При этом предполагается, что совокупность моделей перевозок между всеми парами транспортных узлов и составляет модель перевозок в рамках всей транспортной сети. Такой подход не применим для описания продвижения вагонопотоков, так как если движение грузопотоков определяется кратчайшими расстояниями, то на продвижение вагонопотоков (особенно порожних) оказывает большое влияние ряд внешних факторов. Кроме того, неструктурированность модели перевозочного процесса не позволяет на строгом математическом уровне подойти к решению проблем управления вагонопотоками.

В современной литературе значительное внимание уделяется использованию динамических моделей (транспортных карт) для решения задач, связанных, в первую очередь, с управлением грузопотоками и решением отдельных эксплуатационных задач [2]. Проблема планирования продвижения вагонопотоков, несмотря на схожесть в постановке задач, имеет ряд особенностей и представляет собой новую постановку, которая в литературе по данной тематике отсутствует.

Таким образом, ставится задача математического описания продвижения вагонопотоков по сети железной дороги с учетом влияния различных внешних факторов (динамической модели) и применения данной методологии для решения задач технического нормирования. В рамках поставленной задачи от математической модели требуется не только расчет интегральных показателей продвижения вагонопотоков, но и распределение этих перевозок по заданной топологии транспортной сети.

Основой для разработки динамической модели движения вагонопотоков является транспортная сеть железной дороги, состоящая из множества транспортных узлов (вершин) и коммуникационных связей между ними (дуг). В качестве вершин выступают станции формирования, зарождения и погашения вагонопотоков,

внутридорожные и междорожные пункты перехода вагонов (стыки). Комбинация элементарных участков позволяет рассчитывать количественные показатели эксплуатационной работы для различных структур (станция, участок, диспетчерский участок, район управления, отделение и т.д.) и дает возможность устанавливать более объективные технические нормы эксплуатационной работы.

Математически транспортная сеть представляет собой связный ориентированный граф, структура которого в общем случае является произвольной. Если все участки сети используются в обоих направлениях, то топологию сети можно описывать неориентированным графом.

Вершина – элемент транспортной сети. Каждой вершине присвоен некоторый номер i .

Дуга – это элемент транспортной сети, соединяющий две ее (различные) вершины. Дугу, соединяющую вершину i с j будем обозначать $s(i, j)$.

Длина дуги $s(i, j)$ – число $l(i, j) \geq 0$, приписываемое данной дуге.

Ребро u_{ij} – можно рассматривать как совокупность двух дуг $s(i, j)$ и $s(j, i)$.

Путь (маршрут) от вершины i до j – это последовательность дуг $s(i, k_1)$, $s(k_1, k_2)$, $s(k_2, k_3)$, ..., $s(k_l, j)$. Путь от вершины i до j будем обозначать $S[i, j]$. Заметим, что дуга $s(i, j)$ определяет путь $S[i, j]$.

Длина пути (контура) – это сумма длин составляющих его дуг.

Пропускная способность дуги $s(i, j)$ – это число $d(i, j)$, приписываемое данной дуге.

Поток по дуге $s(i, j)$ – это величина $q(i, j)$, которая не больше пропускной способности дуги $d(i, j)$. Определено, что поток мощности $q(i, j)$ исходит из вершины i и входит в вершину j .

Алгебраический поток по дуге $s(i, j)$ – это величина $\bar{q}(i, j)$, равная разности потоков по дуге в прямом и обратном направлениях: $\bar{q}(i, j) = q(i, j) - q(j, i)$.

Суммарный поток из вершины i – это сумма потоков $q(i, j)$ по всем исходящим из вершины

i дугам $s(i,j)$. Обозначив через U_i множество номеров концов дуг, исходящих из вершины i , суммарный исходящий поток, можно представить как $\sum_{j \in U_i} q(i,j)$.

Суммарный поток, входящий в вершину i , – это сумма потоков $q(i,j)$ по всем входящим в вершину i дугам $s(i,j)$. Обозначив через B_i множество номеров концов дуг, входящих в вершину i , суммарный входящий поток, можно представить в виде суммы $\sum_{j \in B_i} q(i,j)$.

Таким образом, введенные выше определения математически полностью формализуют понятие транспортной сети рассматриваемого региона и составляют основу для описания процесса перевозок.

Математическое описание грузовых перевозок на транспортной сети может быть рассмотрено с точки зрения двух подходов – дифференциальном и интегральном. При дифференциальном подходе транспортный процесс описывается количеством переработанных вагонов за единицу времени в данном транспортном узле. При интегральном подходе основой описания является количество перемещенных вагонов за единицу времени между двумя транспортными узлами. Для решения задач технического нормирования целесообразно применять интегральный подход.

Учет продвижения вагонопотока характеризуется операциями, выполняемыми с ним в процессе следования по сети дороги. Поэтому *единичным актом перевозки* будем называть процесс изменения местонахождения вагона за время между моментом изменения состояния загрузки вагона (погрузка, выгрузка) или его приема на подразделение до следующего момента изменения его состояния или сдачи на другое подразделение. Использование изменения состояния вагона позволяет провести математическое описание продвижения как груженых, так и порожних вагонов. Тогда информацию о единичном акте перевозок можно представить в виде совокупности следующих характеристик:

- пункт начала учета перевозки i ;
- пункт окончания учета перевозки j ;
- род перевозимого груза G
- состояние загрузки вагона $G=0$;
- род подвижного состава R ;
- вид собственности K ;
- принадлежность вагона Q ;

- дата и время начала учета перевозки t_0 ;
- дата и время окончания перевозки t_k .

Весь процесс перевозок в рамках рассматриваемой сети определяется суммированием единичных актов перевозки, поэтому наиболее полное описание перевозок в сети задается множеством

$$P = \{ \{i, j, G, R, K, Q, t_0, t_k\}_p, p=1, P \} \quad (1)$$

Исходя из (1), число перемещенных вагонов из пункта i в пункт j за интервал времени $[T_1, T_2]$ будет равно

$$n_{ij}^{RKQ} = \sum_{p=1}^P PZ_p(i, j, T_1, T_2), \quad (2)$$

где $Z_p(\cdot)$ – индикаторная функция, численно равная единице, если заданы все параметры перевозки, и равная 0 в противном случае.

Таким образом, транспортную сеть S с заданными на ее структуре вагонопотоками

$$N^{RKQ} = \{ n_{ij}^{RKQ} = \sum_{p=1}^P PZ_p(i, j, T_1, T_2), \forall i, j : S \} \quad (3)$$

будем называть **динамической моделью перевозок грузов**.

При решении ряда задач исключительно важную роль играют таблицы оптимальных путей (ТОП), пример которой приведен в табл. 1.

Таблица 1

Таблица оптимальных путей

Номер вершины i	Номер предшествующей вершины λ_i	Потенциал p_i
1	$\lambda(1)$	$p(1)$
2	$\lambda(2)$	$p(2)$
...
i	$\lambda(i)$	$p(i)$
...
m	$\lambda(m)$	$p(m)$
...
N	$\lambda(N)$	$p(N)$

Каждая из таких таблиц состоит из N строк (N – число вершин транспортной сети) и трех столбцов. В первом столбце таблицы записываются номера вершин транспортной сети. Во втором и третьем столбцах i -й строки записываются соответственно номер вершины i , предшествующей в кратчайшем пути вершине λ_i , и потенциал p_i вершины i . При этом хотя

бы для одной вершины $\lambda_m = m$, то есть хотя бы одна вершина является начальной по ТОП.

Кроме того, должны выполняться следующие четыре условия:

1) если $\lambda(i) \neq i$, то должна существовать дуга $s(\lambda(i), i)$, для которой предшествующая вершина $\lambda(i)$ является началом, а рассматриваемая вершина i – концом;

2) любой путь, составляющие дуги которого имеют вид $s(\lambda(i), i)$, является элементарным. Это означает, что, взяв любую вершину k , для которой $\lambda(k) \neq k$, можно построить последовательность различных вершин с номерами $k_1 = k$, $k_2 = \lambda(k_1)$, $k_3 = \lambda(k_2)$, ..., $k_l = \lambda(k_{l-1})$, причем $k_l = \lambda(k_l)$, то есть от любой вершины k по ТОП можно построить путь к одной из начальных вершин;

3) потенциалы $p(i)$ должны быть такими, что $p(i) - p(\lambda(i)) = r(\lambda(i), i)$, если $\lambda(i) \neq i$, где $r(\lambda(i), i)$ – оценка дуги $s(\lambda(i), i)$;

4) потенциалы $p(i)$ должны быть не больше заданного числа \bar{M} . Причем, если для какой-либо вершины $p(i) = \bar{M}$, то обязательно $\lambda(i) = i$ (вершина является начальной по ТОП). В качестве числа \bar{M} обычно берется наибольшее представимое в используемом для хранения значений потенциалов машинном формате значение.

Таким образом, **начальная вершина** по заданной ТОП – это вершина m , для которой $\lambda(m) = m$ и потенциал $p(m) < \bar{M}$ (\bar{M} – достаточно большое число, большее, чем оценка любого элементарного пути).

Концевая вершина по заданной таблице оптимальных путей – это вершина j такая, что для любого $i = 1, 2, \dots, N$ $\lambda(i) \neq j$.

Изолированная вершина по заданной таблице оптимальных путей – это вершина k , для которой $\lambda(k) = k$ и потенциал $p(k) = \bar{M}$.

Путь по таблице оптимальных путей – это путь, составляющие дуги которого имеют вид $s(\lambda(k), k)$.

Таблица оптимальных путей от одной вершины m – это такая таблица, в которой имеется только одна начальная вершина m .

ТОП применяются при организации распределения порожнего вагонопотока, исходя из кратчайших расстояний между вершинами сети, а также используются при планировании продвижения вагонопотока. В научных исследованиях других авторов делается допущение, что сеть железной дороги является неизменной на протяжении значительного промежутка времени. Однако влияние внешних факторов (например производство капитального ремонта пути) может изменить маршрут следования вагонопотока. Таким образом, изменяя оценку дуги $r(\lambda(i), i)$, можно планировать продвижение вагонопотоков.

Для решения эксплуатационных задач используются три модели следования вагонопотоков: *эталонная, оперативная и статистическая*.

Эталонная модель отображает не фактический характер перевозок, а строится на основании действующего плана формирования поездов и отображает нормативные маршруты следования вагонопотоков со всех станций дороги. При этом промежуточные станции, находящиеся на участках (дугах сети), прикрепляются к опорным станциям, согласно существующим технологиям развоза местного груза.

Оперативная модель используется для текущего планирования и анализа работы дороги и отображает продвижение вагонопотоков в реальном режиме времени (съем информации может производиться и через заданные интервалы времени).

Статистическая модель отражает среднесуточные размеры движения на маршрутах и рассчитывается по факту свершения конечных операций (для ввоза груженых вагонов – выгрузки, для вывоза и транзита – сдачи и т.д.). Оперативная и статистическая модель детализируются по роду груза, типу подвижного состава, его принадлежности и виду собственности.

Информационной базой для создания динамической модели является вагонная модель, реализованная средствами АСОУП. Причем в зависимости от периода планирования могут быть различные алгоритмы расчета вагонопотоков по участкам. Наиболее полную информацию о продвижении вагонопотоков можно получить на основании выполненной работы – обратным ходом от конечного учета момента перевозок. Недостаток такого расчета – отставание полученной информации от фактической ситуации на сети дороги (на период 0.5 – 1 сутки). Однако для задач месячного планирова-

ния такая задержка является вполне приемлемой.

Таким образом, использование динамических моделей позволяет решать ряд задач стратегического и оперативного планирования перевозок, проводить анализ плана формирования и графика движения поездов, разрабатывать управляющие воздействия на систему перевозок и производить анализ этих воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерофеев А. А. Математическое обеспечение системы регулирования парка порожних вагонов / А. А. Ерофеев, О. Н. Лисогурский, Г. Ю. Мишин // Комплексная эксплуатация видов транспорта: Межд. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2004. – 205 с.

2. Кузнецов А. П. Методологические основы управления грузовыми перевозками в транспортных системах. – ВИНТИ РАН, 2002. – 276 с.
3. Правдин Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М.: Транспорт, 1987. – 247 с.
4. Резер С. М. Оптимизация процесса грузовых перевозок. – М.: Наука, 1980. – 296 с.

Поступила в редколлегию 20.08.2007.