УДК 656.225: 004.047
ББК 39.275

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПЕРИОДОВ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Мишкуров П. Н.[1]
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, г. Магнитогорск)

Представлена постановка задачи динамической оптимизации параметров вагонопотоков и алгоритм корректировки их структуры и маршрутов движения в железнодорожных транспортных узлах или на путях необщего пользования промышленных предприятий.

Ключевые слова: вагонопоток, железнодорожный транспортный узел, динамическое программирование, период оптимизации, оперативное управление.

Результаты анализа работы железнодорожного транспорта промышленных предприятий показывают, что в течение последних семи лет время нахождения железнодорожных вагонов на путях необщего пользования промышленных предприятий увеличилось в среднем на 20%. Также наблюдается усложнение структуры вагонопотоков в результате возникновения и развития компаний-операторов собственных вагонов и появления большого числа нерегулярных струй вагонопотоков малой мощности [7, 8]. Это приводит к возникновению потерь в среднем до 20-30 млн. рублей для предприятий со среднесуточным вагонооборотом 2 тыс. вагонов в результате перепростоя вагонов и нерационального использования транспортной инфраструктуры [6,10,11].

[1] *Павел Николаевич Мишкуров, аспирант* (*mishkuroff@mail.ru*).

Основная причина возникновения подобных явлений заключается в том, что принятая в настоящее время форма организации управления вагонопотоками недостаточно точно в оперативном режиме учитывает усложнение структуры вагонопотоков [3].

Современным инструментом управления вагонопотоками являются методы динамической оптимизации. Известный метод «динамического согласования» производства, транспорта и потребления основаны на применении многоэтапного (многошагового) подхода при решении задачи оптимизации и представляют собой развитие содержательной постановки задачи линейного программирования в динамическую область, позволяют учитывать распределение объемов производства и потребления во времени, изменение запасов продукта в конечных и промежуточных пунктах [1,4,5]. Несовершенством методов динамического согласования является недостаточная точность решения задачи управления вагонопотоками на этапе оперативного планирования, если этапы оптимизации (расчетные периоды) имеют фиксированные границы (продолжительность). В случае возникновения на путях необщего пользования нерегулярных струй вагонопотоков, отличных от расчетных по мощности и времени обращения, использование фиксированных расчетных периодов приводит к ожиданию вагонопотоков следующего (текущего) периода (рис.1). Задержки в принятии управленческого решения по продвижению нерегулярных струй вагонопотока являются причиной увеличения времени оборота вагонов на путях необщего пользования промышленных предприятий [8].

Для повышения эффективности перевозочного процесса промышленного предприятия необходимо управлять вагонопотоками с момента их появления в железнодорожном транспортном узле до момента «вывода», учитывая возникновение нерегулярных струй вагонопотоков на этапе оперативного планирования перевозочного процесса. Инструментом принятия решений по управлению вагонопотоками в таких условиях предлагается использовать разработанную математическую модель, основанную на усовершенствованном методе «динами-

ческого согласования» и учитывающую изменение длительности расчетных периодов оптимизации.

Задача динамической оптимизации с использованием расчетных периодов переменной длительности формулируется следующим образом. Пусть Gr = (P, E) есть связный и не имеющий петель граф, где $P \in (p_i | i = \overline{1,m})$ – множество вершин m – количество вершин), $E \in (e_i | i = \overline{1,n})$ – множество дуг (n – количество дуг), $[t, t_0]$ – расчетный период переменной длительности, [0, T] – период оптимизации. Отображение $d_{ij}(t)$ и $d_{ii}(t)$ будем называть резервом пропускной способности дуги и вершины соответственно на каждый момент времени t расчетного периода, т.е. каждой дуге e_i сопоставлено неотрицательное число $d_{ij}(t)$, называемое резервом пропускной способности i-ой дуги, а каждой вершине p_i сопоставлено неотрицательное число $d_{ii}(t)$, называемое резервом перерабатывающей способности i-ой вершины (рис. 2) [6].

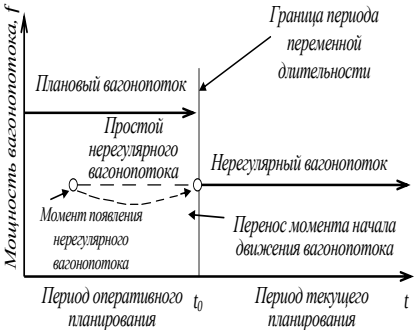

Рис. 1. Схема переноса вагонопотока

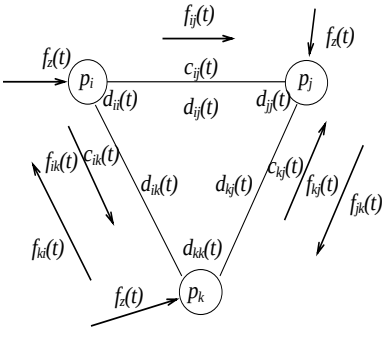

Рис. 2. Фрагмент транспортной сети

Таким образом, $D_{ij} \in (d_{ij} | i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n})$ – множество резервов пропускных способностей дуг и $D_{ii} \in (d_{ii} | i = \overline{1,n})$ – множество резервов перерабатывающих способностей вершин, где $d_{ij}(t), d_{ii}(t) \in R^+$ есть значения резервов пропускных способностей i-ой дуги и i-ой вершины, определенных на множестве действительных неотрицательных чисел. Тогда $G \in (P, E, D_{ij}, D_{ii})$ есть транспортная сеть, $d_{\min}$ - граница поля допуска, т.е. минималь-

ный резерв пропускной d_{ij}(t) и перерабатывающей d_{ii}(t) способности дуг и вершин транспортной сети на каждом маршруте движения вагонопотока.

Отображение f_{ij}(t) будем называть вагонопотоком в дуге i из начальной вершины p_i в конечную вершину p_j, а $F_{ij} \in (f_{ij} | i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n})$ – есть множество вагонопотоков в дугах сети G, где $f_{ij}(t) \in R^+$ – значения потока в i-ой дуге, определенные на множестве действительных неотрицательных чисел, c_{ij}(t) – затраты на движение единицы мощности вагонопотока f_{ij}(t).

Пусть величина мощности вагонопотока f_{ij}(t) имеет случайный разброс, тогда в каждый момент отправления t оно будет $f_{ij}(t) \pm y_i(t)$, где y_i(t) – случайная величина. В этом случае (рис. 4), если мощность вагонопотока будет ($f_{ij}(t) - y_i(t)$), возникают потери в результате нерационального использования транспортной инфраструктуры. Следовательно, маршрут движения вагонопотока целесообразно скорректировать, выбрать и учесть на этапе оперативного планирования маршрут с минимальной границей поля допуска $d_{\min}$. Однако в этом случае необходимо учитывать дополнительные затраты, связанные с корректировкой маршрута движения вагонопотока. Таким образом, если мощность вагонопотока будет ($f_{ij}(t) + y_i(t)$), то наблюдаются:

1. недостаток резерва пропускной способности на маршруте движения вагонопотока, в результате чего возникают дополнительные затраты на корректировку этого маршрута (рис. 3);

2. потери от простоя нерегулярного вагонопотока мощностью y_i(t) в результате разделения фактического вагонопотока (рис. 4);

3. Затраты при движении нерегулярного вагонопотока мощностью y_i(t) по транспортной сети (рис. 5).

Требуется найти минимальную сумму затрат на движение, простой и изменение структуры вагонопотоков с учетом дополнительных затрат на корректировку их маршрутов [8]. То есть функционал имеет вид $J_1+J_2+J_3+J_4 \rightarrow \min$ (1),
где транспортные расходы:

$$(2) \quad J_1 = \sum_{t=0}^{T} \sum_{p_i, p_j \in P} c_{ij}(t) \cdot f_{ij}(t),$$

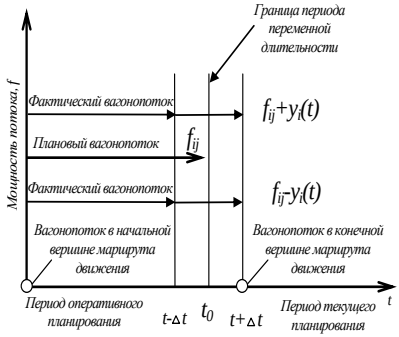

Рис. 3. Схема изменения границы периода оперативного планирования

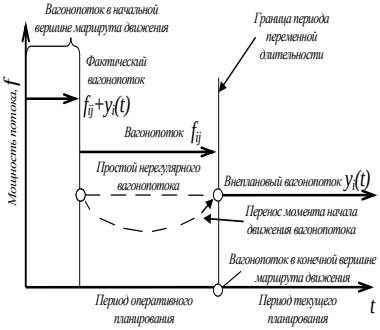

Рис. 4. Схема переноса нерегулярного вагонопотока

затраты на простой вагонопотока:

$$(3)\quad J_1 = \sum_{t=0}^{T} \sum_{p_i, p_j \in P} c_{ii}(\mathrm{t}) \cdot f_{ij}(\mathrm{t}) \ .$$

Составляющие J_3 и J_4 зависят от вида и параметров закона распределения. Обозначим границу периода динамической оптимизации моментом t_0. Если момент завершения движения фактического вагонопотока t произойдет раньше t_0 (т.е. $t < t_0$), то возникают потери от простоя вагонопотока в течение времени t_0–t в ожидании начала следующего периода оптимизации. В противном случае появляются дополнительные расходы на корректировку маршрута продвижения фактического вагонопотока.

Пусть c_1 – единичные потери от простоя вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации, c_2 – единичные расходы на корректировку маршрута продвижения фактического вагонопотока, тогда потери от простоя вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации определятся как

$$(4)\quad J_3 = \sum_{\mathrm{t}_0=0}^{T} f_{ij}(\mathrm{t}) \cdot c_1(\mathrm{t}_0 - \mathrm{t}),$$

а расходы на корректировку маршрута движения фактического вагонопотока:

(5) $J_4 = \sum_{t_0=0}^{T} f_{ij}(t) \cdot c_2(t - t_0)$.

Если единичный ущерб от простоя вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации c_1 больше единичных затрат на корректировку маршрута движения фактического вагонопотока c_2, то целесообразно корректировать маршруты движения вагонопотоков путем изменения границ периодов динамической оптимизации. Выбор рациональной границы периода динамической оптимизации t_0 предлагается осуществлять применением обобщённых функций при решении вариационных задач путем дифференцирования и преобразования функции распределения [1] мощности фактического вагонопотока:

(6) $\int_{-\infty}^{t_0} \varphi(t) \cdot dt = \frac{c_2}{c_1 + c_2}$.

Результатом решения данного уравнения является оптимальное соотношение величины минимальных суммарных затрат на простой вагонопотока в ожидании следующего периода оптимизации и затрат на корректировку маршрута продвижения фактического вагонопотока (рис. 6).

При значениях c_2, значительно превышающих c_1, выражение (6) будет стремиться к единице, в противном случае – к нулю.

На целевую функцию (1) накладываются следующие ограничения:

1. Уравнение динамики изменения мощности вагонопотока

$$f_{ij}(t+1) = f_{ij}(t) - \sum_{\substack{p_j \in P \\ i \neq j}} f_{ij}(t) + y_i(t+1) - y_i(t);$$

2. Начальное и конечное условия задачи:

$$f_{ij}(0) = f_{ij}^0 + f_{ij}(t) = 0, _ y_i(t) = 0;$$

3. Условие неотрицательности переменных:

$$f_{ij}(t) \geq 0 _ i \neq j, i = j _ y_i(t) \geq 0;$$

4. Ограничение на резервы пропускных способностей:

$$0 \le f_{ij}(\mathrm{t}) \le d_{ij}, d_{ii} \cdot Ku;$$

$$0 \le f_{ij}(\mathrm{t}) \le d_{\min};$$

где K_u - поправочный коэффициент, учитывающий сложность управления вагонопотоками на станции железнодорожной, рассчитывается по методике, изложенной в работе [2].

Для учета нерегулярных вагонопотоков на этапе оперативного планирования необходимо усовершенствовать алгоритм метода динамического согласования. Предлагается алгоритм корректировки маршрутов движения вагонопотоков с учетом изменения границ переменной длительности (рис. 7). Алгоритм состоит из трех основных частей:

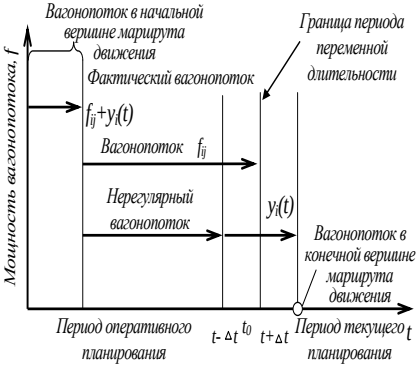

Рис. 5. Схема движения фактического вагонопотока

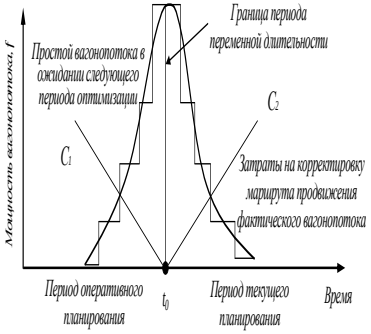

Рис. 6. Определение оптимальной границы периода динамической оптимизации

1. Подготовка исходных данных (*блок 1*). Имеется множество вершин, связанных между собой дугами транспортной сети, часть из которых являются «начальными» (поставщики потока), а остальные «конечными» (потребителями потока) вершинами. Известно время и затраты на движение по каждой дуге транспортной сети, затраты на простой одного вагона, а также величины пропускных и перерабатывающих способностей дуг и вершин транспортной сети;

2. Переход между периодами оптимизации (от последующего периода к предыдущему) (*блок 2*). Данный переход осуществляется на основе учета критерия оптимальности суммарных затрат на продвижение вагонопотоков по транспортной сети, полученного на последующем периоде оптимизации и расчете его границы (6);

3. Анализ состояния системы на каждом периоде оптимизации. Анализ основывается на решении оптимизационной подзадачи, которая, в свою очередь, состоит из следующих этапов:

- сравнение мощности фактического вагонопотока с мощностью вагонопотока на предыдущем этапе. На данном этапе определяется величина отклонения мощности фактического вагонопотока от нормативной (средней) величины (*блок3*);
- оценка резерва пропускной способности на возможность продвижения фактического вагонопотока по транспортной сети. В случае превышения мощности фактического вагонопотока резерва пропускной способности решается ещё одна оптимизационная подзадача по определению рационального деления вагонопотока на отдельные струи (*блок 4*);
- определение длительности периода оптимизации (6). Выбор рациональной границы периода динамической оптимизации t_0 осуществляется в результате применения обобщённых функций при решении вариационных задач путем дифференцирования и преобразования функции плотности распределения мощности фактического вагонопотока. Результат решения – значение минимума суммарных затрат на корректировку маршрута движения и простой каждого фактического вагонопотока (*блок 5*).

Предлагаемая задача динамической оптимизации и разработанный алгоритм ее решения, основанные на использовании расчетных периодов переменной длительности, позволяют учитывать в оперативном режиме изменения маршрутов движения вагонопотоков по транспортной сети и влияние этих изменений на величину пропускной способности дуг транспортной сети.

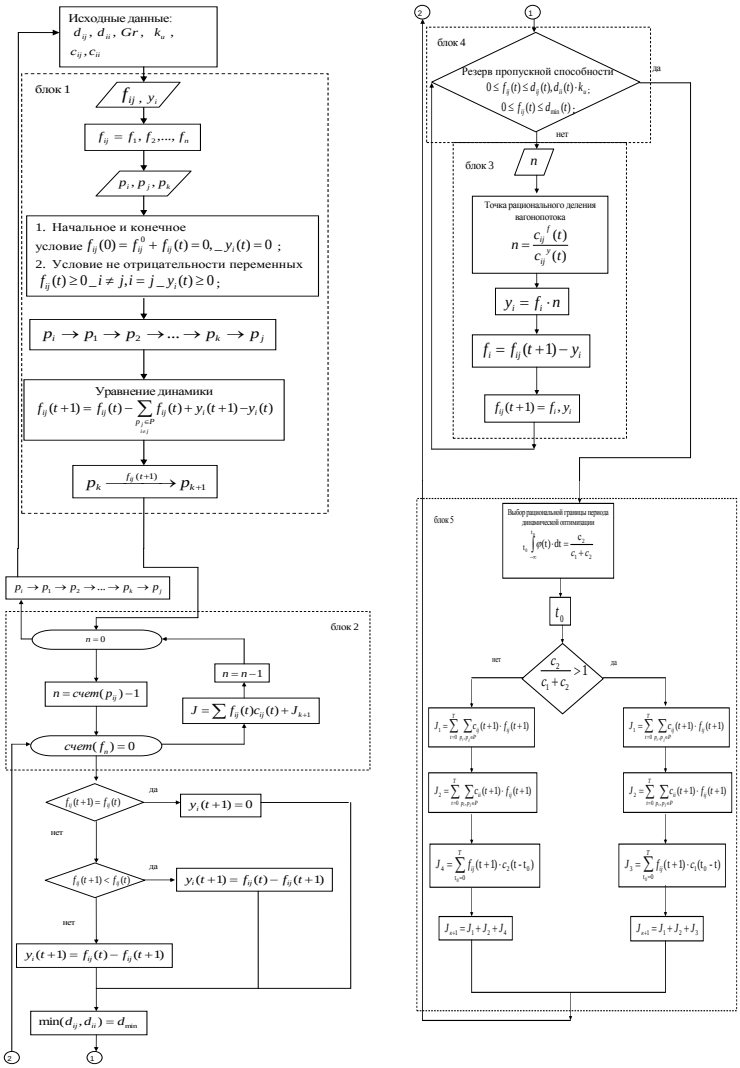

Рис. 7. Алгоритм корректировки маршрутов продвижения вагонопотоков с учетом изменения длительности расчетных периодов

Реализация построенной математической модели в рамках информационных систем на железнодорожном транспорте позволит руководителям перевозочного процесса корректировать маршруты продвижения вагонопотоков на путях необщего пользования промышленных предприятий или в железнодорожных транспортных узлах, что приведет к ускорению продвижения вагонопотоков в условиях усложнения их структуры вагонопотоков и растущего объема грузовых перевозок.

Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А.Э. ЯКУШЕВ Н.В. *Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления* / Управление большими системами. – Выпуск 12-13. -М.: ИПУ РАН, 2006. - С. 5–14.
2. БАГИНОВА В.В., РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования* / Транспорт: наука, техника, управление, 2012. №2. - С. 19-22.
3. БАГИНОВА В.В., РАХМАНГУЛОВ А.Н., ОСИНЦЕВ Н.А. *Контроль вагонопотоков на пути необщего пользования* // Мир транспорта. -2010. -Вып. 3 (31). - С. 108-113.
4. КОЗЛОВ П.А., МИЛОВИДОВ С.П. *Метод динамического согласования производства и транспорта*: Сб. тр. ИКТП. – Выпуск 105. - М.:, 1985. - С. 156-163.
5. МИЛОВИДОВ С.П., КОЗЛОВ П.А. *Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке* // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика., 1982. № 1. - С. 211-212.
6. МИШКУРОВ П.Н. *Постановка динамической транспортной задачи с учетом изменения границ расчетных периодов* // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. №1. - С. 199-202.

7. МИШКУРОВ П.Н. *Энерго- и ресурсосбережение промышленных предприятий на основе рационального управления вагонопотоками* // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - С. 162-167.

8. РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Проблемы использования методов динамического программирования при управлении вагонопотоками* // Современные проблемы транспортного комплекса России: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. №2. - С. 279-285.

9. РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Типизация промышленных железнодорожных станций* // Современные проблемы транспортного комплекса России: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. №2. - С. 143-151.

10. РАХМАНГУЛОВ А.Н., МИШКУРОВ П.Н. *Повышение энергоэффективности промышленного железнодорожного транспорта на основе динамической оптимизации параметров вагонопотоков* // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития' 2012». – Выпуск 3. Том 1. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. - ЦИТ: 312-496 - С. 86-91.

11. РАХМАНГУЛОВ А.Н., ОСИНЦЕВ Н.А. *Оценка резервов пропускной и перерабатывающей способности технологических железнодорожных станций с использованием теории нечетких множеств*//Вестник транспорта Поволжья. -2011. - Вып. 1 (23). - С. 45а-49.

12. ТРОФИМОВ С.В., РАХМАНГУЛОВ А.Н. *Выбор оптимальных методов оперативного управления работой промышленных транспортных систем*: Монография. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И.Носова, 2000. - 145 с.

IMPROVING ACCURACY OF RAILWAY CAR TRAFFIC DYNAMIC OPTIMIZATION BASED ON VARYING

LENGTHS SETTLEMENT PERIODS USAGE

Pavel N. Mishkurov, Magnitogorsk state technical university named after G.I.Nosov, Magnitogorsk, postgraduate (mishkuroff@mail.ru).

Abstract: The problem statement of railroad car traffic volume parameters dynamic optimization as well as parameters structure and movement routes changing algorithm for railway transport hubs or industrial enterprises railroad conditions are presented.

Keywords: railway car traffic, rail transportation hub, dynamic programming, optimization period, operational management.