

Определение резервов пропускной и перерабатывающей способностей железнодорожной сети на основе имитационного моделирования

Е. А. ЕРОФЕЕВА, Д. В. РАТОБЫЛЬСКАЯ, Н. Н. ЗАПОЛЬСКИЙ

Введение. Основное назначение железнодорожной сети (ЖС) состоит в своевременной доставке грузов. Однако ограниченное количество перевозчиков, неудовлетворительные сроки доставки грузов, низкая возможность доставки груза к пунктам потребления снижает заинтересованность заказчиков в железнодорожных перевозках и требует разработки мер, позволяющих минимизировать негативное воздействие указанных факторов. Движение поездов в ЖС организуется в соответствии с утверждённым планом формирования составов (ПФС), который представляет собой план организации вагонопотоков в поезда и план распределения объема работы между различными станциями по формированию, расформированию, пропуску поездов транзитом с учетом критерия технико-экономической целесообразности. Разработка ПФС является сложной задачей, имеющей лишь приближённое решение [1]. Нагрузка на сеть определяется как постоянными, так и впервые планируемыми перевозками, которые имеют случайный характер и определяют вероятностный характер нагрузки. Таким образом, функционирование железнодорожной сети (ЖС) подвержено влиянию случайных факторов и может приводить к возникновению сбоев в обслуживании вагонопотоков даже в условиях реализации утверждённого ПФС.

Для организации бесперебойного функционирования железнодорожной системы необходимо определить резервы ЖС, которые выражаются в некоторой избыточности – дополнительных средствах (локомотивы, вагоны, рельсы, топливо, запасные части и оборудование для текущих и восстановительных ремонтов и т.д.) или дополнительных возможностях (пропускная, провозная, перерабатывающая способности) сверх минимально необходимых для надежного выполнения заданных функций.

Для определения резервов с целью усовершенствования показателей работы железнодорожного транспорта предлагается использовать имитационные модели (ИМ) железнодорожной сети разного уровня детализации в составе комплекса автоматизации имитационного моделирования транспортных систем [2]. Имитационная модель сортировочной станции IM_JST предназначена для исследования доминирующей технологической линии процесса переработки поездопотока станции. ИМ всей железнодорожной сети IM_JS позволяет определить вариант распределения нагрузки и ресурсов ЖС, обеспечивающий минимизацию времени и издержек на транспортировку единицы груза при безусловном обеспечении качества транспортировки и безопасности его для человека и природной среды.

Параметризованность моделей и высокий уровень автоматизации всех этапов моделирования обеспечивает процесс исследования железнодорожной системы без знания технологических аспектов программирования и позволяет оперативно решать типовые задачи имитационного моделирования с учётом имеющихся данных и критериев поиска решения.

Формальное описание функционирования сортировочной станции. Технологический процесс переработки поездопотока на сортировочной станции реализует следующие функции: прием поездов, их подготовку к расформированию, расформирование, накопление составов новых назначений, формирование новых составов, подготовку их к отправлению и отправлению. Он может быть представлен в виде иерархического графа $G_{TXO}(L, W)$, узлами которого являются технологические операции $\{L\}$, а ветвями – переходы от одной технологической операции (TXO) к другой $\{W\}$. В соответствии с графом технологического процесса переработки вагонопотока с использованием аппарата сетевого планирования [3]

строится сетевой график процесса переработки транзитного вагонопотока, параметры которого являются вероятностными. Событиями сетевого графика являются моменты начала и конца ТХО. Рёбрами являются сами ТХО.

Входящий вагонопоток образуют составы, формализованные в виде сложных составных транзактов (ССТ), которые поступая на станцию, разбиваются на вагоны и группы вагонов (кортежи), а затем в соответствии с назначением (ПФС), собираются в новые составы. Состав информации, содержащейся в теле ССТ, определяет последовательность и величину модельного времени обслуживания его технологическими операциями, а также состав и величину необходимых для этого обслуживания ресурсов.

Во время технологического процесса переработки входящего вагонопотока каждая технологическая операция из множества $\{TХО_j, j = \overline{1, L}\}$ для обслуживания ССТ на время её реализации запрашивает следующие ресурсы: путевые ресурсы (α_{ij}); ресурсы маневровых локомотивов (γ_{ij}); ресурсы бригад исполнителей (λ_{ij}). Её выполнение характеризуется временем реализации (t_j) и стоимостью (q_j), величина которых является случайной и описывается с помощью функций распределения, полученных на основании эмпирической информации исследуемой сортировочной станции.

Вектор входных параметров h -го варианта моделирования $G_TХО_h$ включает: граф технологического процесса переработки входящего вагонопотока $G_TХО(L, W)$; функции распределения времени выполнения и стоимости выполнения технологических операций ($F_j(\omega) / F_j(\xi), j = \overline{1, L}$); матрицу вероятностей переходов между ТХО ($\|p_{kl}\|, k, l = \overline{1, L}$); число видов ресурсов исследуемой станции (VR); вектор объёма ресурсов различных видов исследуемой станции ($\|vr_i\|, i = \overline{1, VR}$); матрицу объёма ресурсов различных видов, необходимых для выполнения технологических операций ($\|vr_{ij}\|, i = \overline{1, VR}, j = \overline{1, L}$); число входов/выходов исследуемой станции (VS); число видов составов (M); вектор, определяющий структуру потоков, поступающих на станцию с различных входов ($STR_{input} = \|F_v(\mu)\|, v = \overline{1, VS}$); вектор, определяющий структуру потоков, формируемых на станции для различных выходов ($STR_{output} = \|F_v(\tau)\|, v = \overline{1, VS}$); вектор, определяющий интенсивность поступления составов на сортировочную станцию с различных входов ($INT_{input} = \|F_v(\gamma)\|, v = \overline{1, VS}$); параметры вагонов: интенсивность поступления местных вагонов на станцию ($\lambda = R_v(\nu)$); массу вагонов ($mv = R_v(\varphi)$); род подвижного состава ($tv = R_v(\rho)$); станцию назначения вагонов ($sn = R_v(\sigma)$); параметры составов: массу составов ($ms = R_s(\varphi)$); скорость перемещения составов ($\vartheta = R_s(\nu)$); количество вагонов в составах ($nv = R_s(\xi)$); вид составов (Z).

В результате пересчёта статистик имитации определяется вектор откликов Y_h , соответствующий h -му варианту сочетания параметров моделирования сортировочной станции. Его компонентами являются: пропускная способность станции (PRP); перерабатывающая способность станции (PRB); число отправленных вагонов (составов) в сутки (n_{ot} / N_{ot}); число принятых вагонов (составов) в сутки (n_{pr} / N_{pr}); время/стоимость формирования состава для каждого выхода ($\|tf_{vz}\| / \|qf_{vz}\|, v = \overline{1, VS}, z = \overline{1, M}$); средний простой вагона по выделенным технологическим цепочкам ($\overline{T_{prs-s}}$); коэффициенты загрузки путевых ресурсов ($\eta\alpha_{pp}, \eta\alpha_g, \eta\alpha_{sp}, \eta\alpha_{vit}, \eta\alpha_{po}$); коэффициенты загрузки маневровых локомотивов ($\eta\gamma_g, \eta\gamma_{vit}$); коэффициенты загрузки бригад исполнителей ($\eta\lambda_{пто}, \eta\lambda_{пко}, \eta\lambda_{стс}$).

Особенности формализации железнодорожной сети. Железнодорожная сеть представляет собой граф $G(N, U)$, в котором узлами являются сортировочные станции $\{N\}$, а рёб-

рами – участки дорог $\{U\}$, соединяющие станции. На сортировочных станциях происходит обслуживание составов, поступающих с различных станций ЖС и их переформирование с учётом вагонов, поступающих с прилегающих промежуточных станций, которые должны быть отправлены согласно пункту назначения.

Перемещение транспортных потоков в ЖС реализуется в соответствии с утверждённым ПФС, параметры которого учитываются при моделировании. Обслуживание транспортного потока ЖС предполагает реализацию следующих операций: генерацию вагонов с определёнными параметрами на станциях сети; построение списка станций, определяющих маршруты следования вагонов; распределение вагонов на пути формирования составов, которые определяется пунктами их назначения; формирование составов из местных вагонов и вагонов, поступивших с других станций в составе поездов; отправление поездов со станций; перемещение составов по участкам ЖС; приемка поездов на станцию и их обслуживание.

Вектор параметров k -го варианта моделирования (G_k) образуют следующие величины: граф исследуемой железнодорожной сети $G(N, U)$; план формирования составов, задаваемый массивом $PFS = \|\| pfs_{ijs} \|\|, i, s, j = \overline{1, N}$, элементами которого являются коды сортировочных станций, при перемещении вагона из пункта i в пункт j ; число входов/выходов для множества сортировочных станций ($\|\| vs_i \|\|, i = \overline{1, N}$); матрица пропускных способностей ($\|\| c_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}, u_{ij} \in U$); матрица стоимости перемещения вагона по участку дороги единичной длины из i -того узла ЖС в j -тый узел ($\|\| qe_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}, u_{ij} \in U$); матрица длин участков ЖС ($\|\| l_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}, u_{ij} \in U$); число видов составов, составляющих транспортный поток (M); матрица, определяющая структуру поездопотоков ($STR = \|\| F_{ij}(\mu) \|\|, i, j = \overline{1, N}$); матрица, определяющая интенсивность поступления различных видов составов в ЖС ($INT = \|\| F_{ijk}(\gamma) \|\|, ij = \overline{1, N}, k = \overline{1, M}$); матрицы времени/стоимости обслуживания составов на сортировочных станциях ($\|\| F_{kij-p}(\tau) \|\| / \|\| F_{kij-p}(\psi) \|\|, k = \overline{1, M}, i, j, h = \overline{1, N}$, где k -вид состава, i -станция отправления, j -станция назначения, p -сортировочные станции пути перемещения), элементами которых являются функции распределения времени/стоимости обслуживания составов на сортировочных станциях ЖС, полученные с помощью IM_JST; параметры вагонов: интенсивность поступления местных вагонов на сортировочную станцию ($\lambda_i = R_{vi}(v), i = \overline{1, N}$); массу вагонов ($mv = R_v(\varphi)$); род подвижного состава ($tv = R_v(\rho)$); станцию назначения вагонов ($sn_i = R_{vi}(\sigma), i = \overline{1, N}$); параметры составов: массу составов ($ms = R_s(\varphi)$); скорость перемещения составов ($\mathcal{G} = R_s(v)$); количество вагонов ($nv = R_s(\xi)$) в составах; вид составов (Z).

Вектор откликов моделирования Y_k , полученный обработкой статистических данных включает средние значения: времени перемещения вагонов из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения ($\|\| \bar{t}_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}$); стоимости доставки грузов из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения ($\|\| \bar{q}_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}$); расстояния из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения в условиях рассматриваемого ПФС ($\|\| l_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}$); реализованной пропускной способности при перемещении из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения ($\|\| \bar{pr}_{ij} \|\|, i, j = \overline{1, N}$); суммарного времени простоя вагонов на сортировочных станциях при их перемещении из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения ($\|\| \bar{t}_{-oj_{ij}} \|\|, i, j = \overline{1, N}$); грузо-напряженности ЖС, которая является показателем уровня загрузки сети объемом транспорт-

ной работы и вычисляется по формуле $GN = \sum_{ij \in N} l_{ij} \overline{p_{ij}} / \sum_{ij \in N} l_{ij}$, где $\overline{p_{ij}}$ – средняя величина перевезенного груза по участку ЖС.

Определение резервов сортировочной станции. Пропускная мощность всей ЖС в значительной степени определяется возможностями станций по переработке и пропуску вагонопотоков. Резервы, повышающие пропускную и перерабатывающую способности станций, определяются путём решения следующих задач: определения резерва времени выполнения ТХО по сетевому графику (задача 1); подбора состава и объёма ресурсов, позволяющих ускорить обслуживание вагонопотоков (задача 2); установления структуры технологического процесса переработки вагонопотока (задача 3); выбора состава эвристических управляющих правил, увеличивающих пропускную способность станции (задача 4).

Задача 1. Анализ сетевого графика процесса переработки транзитного вагонопотока с целью выявления резерва времени основан на приведении вероятностного процесса переработки со случайными временами выполнения ТХО и вероятностными переходами к последовательности детерминированных сетевых графиков соответствующих l -ым реализациям процедуры Монте-Карло. Для l -ой реализации формулы расчёта параметров сетевого графика при фиксированных значениях позволяют получить множества ранних и поздних сроков, а также резервов выполнения ТХО $\{(t_{rjl}, t_{pjl}, R_{jl})\}$, где t_{rjl} – ранний срок выполнения ТХО $_j$, t_{pjl} – поздний срок выполнения ТХО $_j$, $R_{jl} = t_{pjl} - t_{rjl}$ – резерв времени. В результате N прогонов ИМ_ЖСТ формируется множество критических путей $\{GRKP_l\}$, по которому определяется интегральный вероятностный граф критических путей $GRKP$. В этом графе выделяется: наиболее вероятный критический путь $GRKP_v$, который отображает ситуации, возникающие при переработке вагонопотока с вероятностью p_{kr_s} и требующие для своей реализации времени T_{kr_s} . При этом проверяется условие $T_{kr_s} < T_e$, где T_e – экспертное время реализации процесса переработки транзитного вагонопотока. Если условие не выполняется, то решается задача перераспределения ресурсов сортировочной станции с целью уменьшения критического времени выполнения сетевого графика.

Задача 2. Своевременное выделение ресурсов сокращает время обслуживания составов на сортировочной станции и увеличивает показатели её пропускной и перерабатывающей способностей. При выделении ресурсов возникает конкуренция между ТХО, которая регулируется подсистемой распределения ресурсов модели.

Структура запросов h -го варианта реализации процесса переработки вагонопотока множеством ТХО описывается вектором R_h , а объём ресурсов определяется вектором $V_h = (\alpha_{ih}, \gamma_{ih}, \lambda_{ih})$. При оценке пропускной и перерабатывающей способностей станции для установившегося поездопотока проводится серия ИЭ, в которых варьируемыми параметрами являются состав и величина ресурсов исследуемой станции. Для этого составляется план ИЭ, в котором устанавливаются границы изменения величины различных видов ресурсов и состав контролируемых откликов. С целью определения лучшего варианта организации обслуживания транспортного потока анализируется вектор откликов $Y_h = f(V_h, R_h)$. Выбирается тот вариант состава и распределения ресурсов, который обеспечивает минимальные значения пропускной и перерабатывающей способностей, при условии, что остальные отклики находятся в допустимых пределах.

Задача 3. С целью исследования структуры технологического процесса переработки транспортного потока контролируются средние значения характеристик реализации функций процесса обслуживания кортежей: время нахождения кортежа в парке прибытия (t_{pp}); время нахождения кортежа в парке прибытия под обработкой (t_{pp_r}); время расформирования состава (t_{rf}); время ожидания накопления транзактов на состав в сортировочном парке (t_{sp}); время нахождения кортежа в парке отправления (t_{po}); время нахождения кортежа в парке

отравления под обработкой (t_{po_r}). В случае, если на каком-либо участке сортировочной станции время обслуживания кортежа превышает допустимое для этого участка значение, исследуется альтернативный вариант с заменой неэффективной технологической цепочки.

Задача 4. Пропускная способность технологической линии переработки транспортно-вагонопотока может быть значительно увеличена за счёт введения организационных мероприятий, основанных на эвристических правилах, полученных опытным путём. Они позволяют в сетевом графике работ использовать вместо детерминированных переходов условные переходы. При этом организуется приоритетный выбор ССТ на их обслуживание технологическими операциями. Признаком, обеспечивающим высокий приоритет, может выступать наличие ресурсов для обслуживания ССТ технологическими операциями, а также наличие в составе ССТ завершающего кортежа, быстрое обслуживание которого приведёт к добавлению его в соответствующий пул и завершению формирования нового ССТ (состава). Эффективность использования правил может быть установлена путём проведения ИЭ и последующим анализом результатов имитации.

Определение резервов всей железнодорожной сети. Максимальный поток, который может быть пропущен по элементам ЖС в единицу времени, составляет пропускную способность сети в целом. Установление соответствия между мощностью сети и величиной потока является условием эффективного функционирования ЖС и обеспечения установленных границ изменения пропускной способности. Повышение пропускной способности всей сети может быть достигнуто различными способами: путём станционного развития; путём совершенствования процесса обслуживания транспортного потока; корректировкой параметров транспортного потока. Использование имитационной модели IM_JS позволяет рассмотреть все перечисленные способы выявления резервов пропускной способности.

Первый способ предполагает выявление и учёт резервов перерабатывающей способности сортировочных станций при планировании перевозок всей сети. Это позволит решить задачу перераспределения нагрузки на сеть за счёт выбора сортировочных станций для вагонов, поступающих с промежуточных станций участков сети. Оптимизация распределения вагонопотока с промежуточных станций участков сети $u_{ij} \in U$ на сортировочные достигается путём пропорционального деления нагрузки в соответствии с вектором резервов пропускной способности смежных сортировочных станций. Для определения элементов вектора резервов сортировочных станций $RSS = \|rss_i\|$, $i \in N$ используются результаты, полученные на модели IM_JST по определению пропускной способности станций. Элементы RSS вычисляются по формуле $rss_i = \frac{PRP_i}{PRP_i + \sum_j PRP_j}$, где PRP_j и PRP_i - пропускные способности j -ой и i -ой сортировочных станций соответственно для всех j таких, что $u_{ij} \in U$.

Второй способ. Для оценки варианта организации обслуживания транспортного потока используется комплексный показатель $F_{JS} = (\|t_{ij}^*\|, \|q_{ij}^*\|, \|l_{ij}^*\|, \|pr_{ij}^*\|, i, j = \overline{1, N})$. Нормирование элементов матриц показателя F_{JS} их максимальным значением позволяет выделить среди исследуемых направлений лучшее в смысле времени доставки, стоимости, расстояния и пропускной способности. При этом среди показателей времени, стоимости и расстояния выбираются направления с минимальными нормированными значениями, а пропускные способности анализируются с целью определения максимума. Рассмотрение комплексного показателя для различных сочетаний пунктов отправления и назначения:

$$f_{ij}^* = \delta_1 \cdot t_{ij}^* + \delta_2 \cdot q_{ij}^* + \delta_3 \cdot l_{ij}^*, \text{ где } t_{ij}^* = \frac{\overline{t_{ij}}}{\max_{ij} \overline{t_{ij}}}, \quad q_{ij}^* = \frac{\overline{q_{ij}}}{\max_{ij} \overline{q_{ij}}}, \quad l_{ij}^* = \frac{\overline{l_{ij}}}{\max_{ij} \overline{l_{ij}}}, \quad 0 \leq \delta_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^3 \delta_i = 1,$$

δ_i -коэффициенты важности откликов, позволит сравнить пути перемещения между собой и упорядочить их по эффективности. Интегральной оценкой варианта функционирования се-

ти является пара значений (PRP^*, F^*) , где $F^* = \sum_{ij} f_{ij}^*$, $PRP^* = \sum_{ij} prp_{ij}^*$, $pr_{ij}^* = \frac{\overline{pr_{ij}}}{\max_{ij} pr_{ij}}$. Она

отражает реализуемую пропускную способность сети и эффективность организации варианта ЖС с учётом выбранных предпочтений. Резервы пропускной способности сети могут быть выявлены путём изменения ПФС.

Третий способ. Для определения влияния организации транспортного потока на пропускную способность сети реализуется моделирование всей сети, при котором рассматриваются различные варианты сочетания параметров потоков. Путём изменения параметров функций распределения матрицы STR для установленного ПФС возможно рассмотрение различных стратегий обслуживания транспортных единиц на сортировочных станциях (отправительской и участковой). Интенсивность поступления составов каждого вида на обслуживание железнодорожной сетью (INT) определяется реализуемой пропускной способностью станций отправления. Для того чтобы сеть функционировала ритмично необходимо чтобы интенсивность планируемых потоков не превышала пропускную способность участков, которая связана с плотностью потока поездов на участке. Плотность потока определяется числом поездов, приходящихся на единицу длины линии. Поэтому проведение моделирования для каждого участка ЖС с целью подбора параметров функций распределения матрицы INT , позволит определить оптимальный уровень плотности потока участков, обеспечивающий максимальную пропускную способность ЖС.

Заключение. Согласованная работа имитационных моделей IM_JST и IM_JS позволяет учесть при моделировании всей сети особенности функционирования различных сортировочных станций ЖС и адаптировать структуру интегрального транспортного потока на сеть с учётом этих особенностей. Выявленные при этом резервы пропускной и перерабатывающей способности ЖС позволят оценить возможную провозную способность сети, то есть тот максимальный груз, который может быть провезён по элементам сети в единицу времени, что позволит составить рациональный план перевозок и оценить возможную прибыль.

Резюме. Рассматриваются способы определения резервов пропускной способности железнодорожной сети с использованием имитационного моделирования.

Abstract. The ways of reserve definition of throughput railway system abilities using imitating modeling are considered

Литература

1. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / под ред. П.С. Грунтова – М.: Транспорт, 1994 – 543 с.
2. Максимей, И. В. Автоматизация этапов разработки и эксплуатации имитационных моделей транспортных систем / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, Е.А. Ерофеева, П.В. Гируц // Проблемы программирования. – 2008. – N4. – С. 104–111.
3. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Уч. пособие / И.В. Максимей, С.И. Жогаль, под общ. ред. И.В. Максимей. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.