

**Е. И. Сукач, Д. В. Ратобыльская,
В. Н. Кулага**

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается задача определения эффективного варианта обслуживания грузового транспортного потока железнодорожной сетью, обеспечивающего максимальную пропускную способность. Предлагаются способы выявления резервов железнодорожной сети на основе имитационного моделирования.

Введение

Основное назначение железнодорожной сети (ЖС) состоит в обслуживании транспортного потока, который имеет сложную структуру и характеризуется множеством пунктов отправления и назначения. Предметом данного исследования является перемещение грузового потока, при условии одновременного приоритетного обслуживания пассажирского потока, который забирает часть ресурсов сети.

Наиболее универсальной характеристикой ЖС является ее эффективность, под которой понимается степень приспособленности сети к выполнению заданных функций. Эффективность перемещения грузового транспортного потока характеризуется стоимостью, скоростью и надежностью. Значения перечисленных параметров зависят от варианта организации функционирования ЖС с учетом имеющихся ресурсов, планируемых перевозок и маршрутов доставки грузов. Для определения варианта функционирования ЖС разработан ряд аналитических методов [1], позволяющих составить план формирования поездов (ПФП) для всех направлений ЖС и установить график движения пассажирских и грузовых поездов, регламентирующий время отправления, приема и пропуска всех категорий поездов по всем станциям ЖС. Разработка ПФП представляет собой многовариантную математическую, технологическую и экономическую задачу, имеющую лишь приближенное решение. Кроме этого, ПФП составляется на один год и учитывает устойчивые перевозки, которым соответствует система относительно стабильных грузопотоков, и впервые запланированные, которые возникают при появлении новых производственных связей. Как постоянные, так и впервые планируемые перевозки подвержены случайным воздействиям, что определяет вероятностный характер нагрузки на сеть. Таким образом, процесс обслуживания транспортного потока ЖС имеет вероятностную природу, и его эффективность может быть оценена с использованием метода имитационного моделирования [2].

С целью совершенствования показателей работы железнодорожного транспорта предлагается использовать имитационную модель (ИМ) ЖС IM_JS, позволяющую 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.

Особенности формализации железнодорожной сети

Железнодорожная сеть представляет собой граф $G(N,U)$, в котором узлами являются сортировочные станции $\{N\}$, а дугами – участки дорог $\{U\}$, соединяющие станции. На сортировочных станциях происходит обслуживание составов, поступающих с различных станций ЖС и их переформирование с учетом вагонов, поступающих с прилегающих промежуточных станций, которые должны быть отправлены согласно пункту назначения.

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

В процессе имитации на каждый узел ЖС прибывают поезда, которые представлены в модели сложными составными транзактами (ССТ). Информация о всех поездах, находящихся в пути, сохраняется в таблице базы данных моделирования и корректируется на каждом шаге моделирования. Перемещение ССТ по участкам сети реализуется процессами, которые синхронизированы в модельном времени и позволяют отобразить одновременное перемещение транспортных единиц в различных направлениях. Прибытие поезда на станцию активизирует поиск свободного пути для его обслуживания (переформирования). Предполагается, что свободный путь всегда имеется на станции. В процессе обслуживания поездов реализуется проверка условия окончания обслуживания вагонов, составляющих эти поезда. Вагоны, которые прибыли на станцию назначения пополняют парк вагонов, а оставшиеся участвуют в процессе переформирования и поступают на соответствующие пути формирования. В процессе формирования составов анализируется узел назначения вагона, и в соответствии с ПФП определяется номер выхода его со станции и маршрут перемещения по ЖС. Если состав в данном направлении уже формируется, то вагон добавляется в его конец. В противном случае активизируется начало формирования нового состава, для которого определяется вид состава.

Вектор параметров k -го варианта моделирования (G_k) образуют следующие величины: граф исследуемой железнодорожной сети $G(N,U)$; ПФП, задаваемый массивом $PFS = \parallel pfs_{ij} \parallel, i, s, j = \overline{1, N}$, элементами которого являются коды сортировочных станций, при перемещении вагона из пункта i в пункт j ; число входов/выходов для множества сортировочных станций ($\parallel vs_i \parallel, i = \overline{1, N}$); матрица пропускных способностей ($\parallel c_{ij} \parallel, i, j = \overline{1, N}, u_j \in U$), элементы которой определяют максимальное число поездов, которое может быть пропущено по участку сети за единицу времени; матрица стоимости перемещения вагона по участку дороги единичной длины из i -го узла ЖС в j -й узел ($\parallel qe_{ij} \parallel, i, j = \overline{1, N}, u_j \in U$); матрица длин участков ЖС ($\parallel l_{ij} \parallel, i, j = \overline{1, N}, u_j \in U$); число видов составов, составляющих транспортный поток (M); матрица, определяющая структуру потоков ($STR = \parallel F_{ij}(\mu) \parallel, i, j = \overline{1, N}$), элементами которой являются функции распределения видов составов $F_{ij}(\mu)$, планируемых для перемещения из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения; матрица, определяющая интенсивность поступления различных видов составов в ЖС ($INT = \parallel F_{ijk}(\gamma) \parallel, i, j = \overline{1, N}, k = \overline{1, M}$), элементами которой являются функции распределения времени поступления составов различных видов, планируемых для перемещения из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения; матрицы времени/стоимости обслуживания составов на сортировочных станциях ($\parallel F_{kijp}(\tau) \parallel / \parallel F_{kijp}(\psi) \parallel, k = \overline{1, M}, i, j, h = \overline{1, N}$, 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; параметры вагонов; параметры составов.

Вектор откликов моделирования Y_k , полученный обработкой статистических данных, включает средние значения: времени перемещения вагонов из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения ($\|\bar{t}_{ij}\|, i, j = \overline{1, N}$); стоимости доставки грузов из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения ($\|\bar{q}_{ij}\|, i, j = \overline{1, N}$); расстояния из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения в условиях рассматриваемого ПФП ($\|\bar{l}_{ij}\|, i, j = \overline{1, N}$); реализованной пропускной способности при перемещении из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения ($\|\bar{p}_{ij}\|, i, j = \overline{1, N}$); суммарного времени простоя вагонов на сортировочных станциях при их перемещении из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения ($\|\bar{t}_{-oj}\|, i, j = \overline{1, N}$); грузонапряженности ЖС, которая является показателем уровня загрузки сети объемом транспортной работы и вычисляется по формуле $GN = \sum_{y \in N} l_y \bar{p}_y / \sum_{y \in N} l_y$, где \bar{p}_y – средняя величина перевезенного груза по участку ЖС.

Способы повышения эффективности сети железнодорожного транспорта

Максимальный поток, который может быть пропущен по элементам ЖС в единицу времени, составляет пропускную способность ЖС. Транспортный поток определяет нагрузку на сеть: чем больше поток, тем выше нагрузка. Определение оптимального транспортного потока для исследуемой сети позволит эффективно использовать ресурсы сети и обеспечить перемещение грузовых потоков максимального объема. Если поток превышает это значение или нагрузка несбалансирована, то сеть будет работать в режиме перегрузок, с задержками, заторами, отказами, экономическими потерями. Если нагрузка недостаточна, то затраты на обслуживание сети будут превышать доходы от грузоперевозок.

Величина потока определяется планом перевозок, включающим заказы на услуги железнодорожного транспорта, которые характеризуются следующими параметрами: пункт отправления; пункт назначения; время отправления; номенклатура груза; масса груза; скорость доставки, требуемая для данного груза (время в пути). Она является первичной при разработке технологий и расчетах оптимальной мощности всех типов станций, расчете плана формирования и графика движения поездов, составлении технических и технологических документов. Поэтому установление соответствия между мощностью сети и величиной заданных или спрогнозированных потоков является условием эффективного функционирования ЖС и обеспечения установленных границ изменения пропускной способности.

Повышение эффективности обслуживания транспортного потока ЖС может быть достигнуто различными способами:

- путем станционного развития и технического оснащения участков сети;
- путем совершенствования процесса обслуживания транспортного потока;
- корректировкой параметров самого транспортного потока.

Использование имитационной модели IM_JS позволяет рассмотреть все перечисленные способы выявления резервов повышения эффективности ЖС.

Первый способ предполагает выявление и учет резервов перерабатывающей способности сортировочных станций при планировании перевозок всей сети. Определение оптимальной структуры технологического процесса переработки вагонопотока, подбор необходимого состава и объемов различных видов ресурсов, определение управляющих стратегий с целью сокращения простоя вагонов при выполнении технологических операций позволит решить задачу перераспределения нагрузки на сеть за счет выбора сортировочных станций для вагонов, поступающих с промежуточных станций участков сети.

Оптимизация распределения вагонопотока с промежуточных станций участков сети $u_j \in U$ на сортировочные достигается путем пропорционального деления нагрузки в соответствии с вектором резервов пропускной способности смежных сортировочных станций. Для определения элементов вектора резервов сортировочных станций $RSS = \|r_{ss}\|, i \in N$ используются результаты, полученные на модели IM_JST по определению пропускной способности станций [3]. Элементы RSS вычисляются по формуле

$$r_{ss} = \frac{PRP_i}{PRP_j + \sum PRP_j},$$

где PRP_j и PRP_i – пропускные способности j -й и i -й сортировочных станций соответственно для всех j таких, что $u_j \in U$.

Кроме этого, выявление резервов сортировочных станций позволит своевременно осуществить переброску технических средств с одной сортировочной станции на другую в те моменты времени, когда производственные мощности станций не справляются с графиком заказа.

С другой стороны, увеличение числа путей участков и их техническое оснащение позволит увеличить пропускную способность участков и, как следствие, реализуемую пропускную способность всей ЖС.

Второй способ. Обслуживание железнодорожного транспортного потока представляет собой весьма сложную задачу, поскольку вагоны могут организовываться в поезда на различных станциях, число которых увеличивается по мере развития ЖС. Выбор пути следования составов предполагает множество вариантов, поскольку часто более эффективно следование вагонов не по кратчайшим направлениям, а по альтернативным высоко технически оснащенным магистралям.

Функционирование сети регулируется утвержденным ПФП, который при моделировании задается массивом PFS и однозначно по коду станции назначения вагона определяет маршрут его перемещения из пункта отправления в пункт назначения. Моделирование обслуживания транспортного потока заданной величины и структуры при неизменном объеме ресурсов ЖС для утвержденного ПФП позволяет оценить ряд экономических и эксплуатационных показателей, на основе чего сделать комплексную оценку эффективности плана формирования транспортных потоков ЖС.

Для оценки варианта функционирования ЖС используется комплексный показатель $F_{js} = (\|t_{ij}\|, \|q_{ij}\|, \|l_{ij}\|, \|pr_{ij}\|, i, j = \overline{1, N})$, учитывающий время, стоимость, расстояние и пропускную способность путей всех сочетаний пунктов отправления и назначения. Нормирование элементов матриц 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:

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

коэффициенты важности откликов, позволяет сравнить пути перемещения между собой и упорядочить их по эффективности. Интегральной оценкой варианта функционирования сети является пара значений

$$(PRP^*, F^*), \quad \text{где } F^* = \sum_{ij} f_{ij}^*, \quad PRP^* = \sum_{ij} prp_{ij}^*, \quad prp_{ij}^* = \frac{pr_{ij}}{\max_{ij} pr_{ij}}.$$

Она отражает реализуемую пропускную способность сети и эффективность организации варианта ЖС с учетом выбранных предпочтений. Следует отметить, что рассмотрение интегральных оценок для множества сочетаний пунктов отправления и назначения в одном направлении, позволяет оценить по эффективности и пропускной способности смежные участки сети и направления. При этом часть нагрузки с наиболее загруженного направления может быть направлена на участок с большей пропускной способностью, обеспечивая таким образом равномерную загруженность ЖС.

Резервы повышения эффективности обслуживания транспортного потока ЖС могут быть выявлены путем изменения ПФП. С этой целью рассматривается альтернативный ПФП $PFS = \|pfs_{ij}\|, i, s, j = \overline{1, N}$. В результате проведения моделирования функционирования сети в условиях нового ПФП формируются элементы вектора $F'_{js} = (\|t'_{ij}\|, \|q'_{ij}\|, \|l'_{ij}\|, \|pr'_{ij}\|, i, j = \overline{1, N})$. Поэлементное вычитание матриц времени перемещения, стоимости доставки, расстояний и пропускной способности позволяет выявить резервы этих величин для различных сочетаний станций отправления и назначения: $\|rt'_{ij}\| = \|t'_{ij}\| - \|t_{ij}\|$, $\|rq'_{ij}\| = \|q'_{ij}\| - \|q_{ij}\|$, $\|rl'_{ij}\| = \|l'_{ij}\| - \|l_{ij}\|$, $\|rpr'_{ij}\| = \|pr'_{ij}\| - \|pr_{ij}\|$.

Суммирование элементов матриц резервов позволяет оценить общий выигрыш по времени (RT), стоимости (RQ), расстоянию (RL) и пропускной способности (RPR) при переходе к альтернативному ПФП: $RT = \sum_{ij} rt'_{ij}$; $RQ = \sum_{ij} rq'_{ij}$; $RL = \sum_{ij} rl'_{ij}$; $RPR = \sum_{ij} rpr'_{ij}$.

Следует отметить, что рассмотрение множества вариантов ПФП при имитационном моделировании функционирования сети не является сложной задачей, поскольку задание ПФП сводится к определению элементов массива PFS . Поэтому возможно исследование большого числа вариантов с целью определения лучшего из них в смысле выбранных критериев. Формирование и анализ интегральных показателей исследу-

дуемых вариантов ПФП позволит определить вариант, обеспечивающий максимальную пропускную способность и достаточный уровень эффективности. При этом необходимо учитывать, что вариант ПФП, имеющий минимальную стоимость реализации, имеет преимущества перед остальными, поскольку обнаруженные резервы времени и длины пути могут быть использованы для предотвращения сбоев в обслуживании транспортного потока.

Третий способ. Грузовой транспортный поток представляет собой композицию многих более простых потоков и имеет свои особенности, связанные с большой массой и скоростью транспортных единиц, способами его регулирования, пропуска, возникновения и погашения на станциях и в узлах.

Для определения влияния организации транспортного потока на эффективность ЖС реализуется моделирование всей сети, при котором рассматриваются различные варианты сочетания параметров потоков и транспортных единиц их составляющих. Множество исследуемых вариантов определяется числом различных сочетаний видов и параметров составов, поступающих в сеть с различных станций и имеющих некоторый пункт назначения.

Исходными данными моделирования является информация, задающая структуру потока (STR), интенсивность поступления составов (INT), параметры составов. Путем изменения параметров функций распределения матрицы STR для установленного ПФП возможно рассмотрение различных стратегий обслуживания транспортных единиц на сортировочных станциях. Транспортный поток, включающий только сквозные составы, обеспечивает отправительскую маршрутизацию в сети, при которой составы формируются на станциях отправления и проходят без переработки все промежуточные станции до станции назначения. Формирование транспортного потока только из сборных составов позволяет реализовать участковую маршрутизацию, при которой составы переформируются на каждой сортировочной станции. В последнем случае необходимо минимальное число сортировочных путей на каждой станции, однако требуются значительные перерабатывающие способности этих станций. Кроме этого, увеличивается время нахождения вагонов в пути следования из-за переработки дальних вагонопотоков на всех попутных сортировочных станциях. Рассмотрение промежуточных вариантов путем проведения имитационных экспериментов расширит выбор рационального варианта организации транспортных потоков, обеспечивающего минимальные затраты в условиях реализации максимальной пропускной способности.

Интенсивность поступления составов каждого вида на обслуживание железнодорожной сетью (INT) определяется реализуемой пропускной способностью станций отправления, на которых происходит формирование составов для множества назначений. Причем вид состава существенным образом влияет на время его формирования. Длительное время формирования сквозных составов обусловлено накоплением вагонов с одним назначением. Сборные составы включают вагоны, которые имеют различные станции назначения, и формируются до ближайших сортировочных станций, как правило, быстрее.

Для того чтобы сеть функционировала ритмично интенсивность планируемых потоков не должна превышать пропускную способность участков (c_y), которая связана с плотностью поездов на участке. С увеличением интенсивности поступления составов плотность потока растет. Если при этом режимы движения поездов не нарушаются, то реализованная пропускная способность участка возрастает. Однако в случае чрезвычайно высокой плотности потока возникают неблагоприятные режимы продвижения составов. Они периодически останавливаются на некоторые отрезки времени, реализуемая пропускная способность в течение этих отрезков времени равна нулю, и чем больше таких отрезков на участках, тем ниже реализуемая пропускная способность в целом. Поэтому проведение моделирования для каждого участка ЖС с целью подбора параметров функций распределения матрицы INT , позволяет определить оптимальный уровень плотности участков, при которых пропускная способность будет максимальна. Найденные параметры функций распределения должны быть учтены при решении задачи выбора технологии обслуживания и ресурсов сортировочных станций, обеспечивающих указанную интенсивность поступления составов в ЖС.

Следует отметить, что на интенсивность и плотность потока оказывают влияние такие параметры поездов, как масса (ms) и длина (nv). Увеличение массы и длины поезда уменьшает интенсивность и плотность транспортного потока, при неизменной реализуемой пропускной способности. Комплексное рассмотрение взаимосвязанных параметров потока позволит повысить уровень исследований и обеспечить выбор наиболее значимых из них для эффективного обслуживания транспортного потока.

Заключение

Параметризованность ИМ_ЖС обеспечивает процесс исследования эффективности ЖС без знания технологических аспектов программирования и позволяет оперативно решать типовые задачи имитационного моделирования с учетом имеющихся данных и критериев поиска решения. При этом пути повышения эф-

фактивности обслуживания вагонопотока могут планироваться не только с учетом возрастающих объемов работы, но и с учетом возможного уменьшения объема работы ЖС. Образовавшиеся в этом случае резервы должны использоваться для улучшения качества транспортного процесса.

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. – № 4. – С. 104–111.

3. Максимей, И. В. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети / И. В. Максимей, Е. И. Сукач, Е. А. Ерофеева, П. В. Гируц // Математические машины и системы. – 2008. – № 4. – С. 147–153.

Сукач Елена Ивановна, доцент кафедры математических проблем управления Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, кандидат технических наук, доцент, elena.sukach@mail.ru

Ратобильская Дарья Викторовна, аспирант кафедры математических проблем управления Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, dar_ja@tut.by

Кулага Вадим Николаевич, магистрант кафедры математических проблем управления Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, vadim_kulaga@epam.com