

УДК 681.3

## Определение эффективности плана формирования транспортных потоков железнодорожной сети с помощью имитационного моделирования

Е. А. ЕРОФЕЕВА, В. Н. КУЛАГА, И. В. МАКСИМЕЙ, Е. И. СУКАЧ

**Введение.** Для организации функционирования железнодорожной сети (ЖС) разрабатывается план формирования транспортных потоков, которым устанавливается, какие поезда, из каких групп вагонов и в какие назначения (на какие станции выгрузки или расформирования) должны формировать станции сети железных дорог. Разработка оптимального плана формирования поездов представляет собой весьма сложную задачу, имеющую множество решений. При этом ни один из аналитических методов при большом числе станций в ЖС не гарантирует нахождение оптимального плана формирования [1]. В результате расчетов получается, как правило, план формирования близкий по показателям к оптимальному.

Для реальной ЖС объем и сроки планируемых перевозок являются в определенной степени случайными, что определяет вероятностную природу функционирования сети. Поэтому имитационное моделирование [2] процесса функционирования ЖС для установленного плана формирования транспортных потоков позволит определить «узкие места» сети, создающие диспропорции по месту и по времени при транспортировке грузов, оценить ряд экономических и эксплуатационных показателей, на основе чего сделать комплексную оценку эффективности плана формирования транспортных потоков ЖС.

В статье приводится описание комплекса взаимосвязанных имитационных моделей разного уровня детализации. Для определения рабочих характеристик узлов ЖС предлагается имитационная модель (ИМ) сортировочной станции, позволяющая решить задачи планирования грузоперевозок и исследования процесса переработки транзитного вагонотока. Для анализа эффективности вариантов организации перевозочного процесса при условии выполнения установленного плана формирования составов, реализуемого в условиях случайных воздействий, предлагается использовать ИМ всей ЖС.

**Формализация железнодорожной сети.** Железнодорожная сеть представляет собой граф  $G(N,U)$ , в котором узлами являются станции обслуживания транспортных потоков  $\{N\}$ , а дугами – участки дорог  $\{U\}$ , соединяющие станции. Станции могут быть сортировочными или промежуточными. На промежуточных станциях происходит техническое обслуживание поездов. На сортировочных станциях формируются вагоны и поступают вагоны с прилегающих промежуточных станций, которые должны быть отправлены согласно пункту назначения. Станции ЖС описываются следующими параметрами: типом вершины ( $r_i$ ); количеством вагонов ( $nv_i$ ); количеством локомотивов ( $nl_i$ ); интенсивностью поступления вагонов на формирование ( $\lambda_i$ ); вектором вероятностей выбора пункта назначения для вагона ( $\|p_i\|$ ); стоимостью переработки (технического обслуживания) составов на станциях ( $q_i$ ). Количество вагонов ( $nv_i$ ) и количество локомотивов ( $nl_i$ ) определяют ресурсы станций и изменяются в заданных пределах. Интенсивность поступления вагонов определяет число вагонов, заполненных грузом и поступающих в узел на формирование в единицу времени. Её величина задаётся функцией распределения  $R_i(\tau)$ . Для каждого заполненного грузом вагона по вектору вероятностей  $\|p_i\|$  определяется пункт назначения.

Участки железных дорог описываются следующими параметрами: пропускной способностью участка дороги между узлами ЖС ( $c_{ij}$ ); провозной способностью участка дороги между узлами ЖС ( $g_{ij}$ ); длиной участка дороги между узлами ЖС ( $l_{ij}$ ); стоимостью перемещения состава по участку дороги единичной длины из  $i$ -того узла ЖС в  $j$ -тый узел ( $q_{ij}$ ). Про-

пуская способность железнодорожной линии характеризует мощность железнодорожной линии – это то максимальное число поездов, которое может быть пропущено по линии за единицу времени. Она зависит от числа путей на линии ( $np_{ij}$ ), ее технического оснащения и других параметров. Провозная способность железнодорожной линии определяется тонно-километрами в единицу времени, которые могут быть реализованы на линии в зависимости от возможного числа грузовых поездов и их массы. Количество грузов, которое способна пропустить через себя дорога из  $i$ -того узла транспортной сети в  $j$ -тый узел за единицу времени вычисляется по формуле  $g_{ij} = c_{ij} \cdot M_c$ , где  $M_c$  – средняя масса состава. Длина дороги задаётся в условных единицах. Стоимость перемещения состава по участку дороги единичной длины из  $i$ -того узла ЖС в  $j$ -тый узел вычисляется по формуле  $q_{ij} = nv \cdot qv_{ij}$ , где  $nv$  – количество вагонов в составе,  $qv_{ij}$  – стоимость перемещения одного вагона.

Транспортными единицами ЖС являются составы, которые состоят из вагонов. Предполагается, что составы могут быть двух типов: сборными и сквозными. Сквозные составы состоят из вагонов, у которых пункты назначения совпадают. Сборные поезда включают вагоны с различными пунктами доставки груза, для которых направления следования определены согласно установленному плану формирования поездов и совпадают. Вагоны описываются следующими параметрами: станцией отправления ( $vst_o$ ); станцией назначения ( $vst_n$ ); типом вагона ( $tv$ ); массой вагона вместе с грузом ( $mvg$ ). Параметрами составов являются: тип состава ( $ts$ ); количество вагонов ( $nv$ ); тип локомотива ( $tl$ ); станция отправления ( $st_o$ ); станция назначения ( $st_n$ ); время формирования состава в пункте отправления груза ( $t_{if}$ ); время расформирования/формирования сборного состава на промежуточных сортировочных станциях ( $t_{ip}$ )/( $t_{if}$ ); время расформирования состава в пункте назначения груза ( $t_{ip}$ ); время обслуживания на сортировочной станции сквозного состава ( $t_{trp}$ ); время обслуживания состава на промежуточной станции ( $t_{trp}$ ). Количество вагонов задаётся в соответствии с табличной функцией распределения  $F(nv)$ , принимающей значения на интервале  $[nv_1, nv_2]$ , где  $nv_1$  – минимальное число вагонов в составе,  $nv_2$  – максимальное число вагонов в составе. Временные задержки ( $t_{if}$ ), ( $t_{ip}$ ), ( $t_{trp}$ ), ( $t_{imp}$ ) определяются по функциям распределения  $F(\tau_{if})$ ,  $F(\tau_{ip})$ ,  $F(\tau_{imp})$ ,  $F(\tau_{imp})$ , полученным в результате экспериментов с ИМ сортировочной станции.

Перемещение транспортных потоков в ЖС реализуется в соответствии с утверждённым планом формирования составов, в соответствии с которым однозначно определяется маршрут перемещения транспортных единиц из пункта отправления в пункт назначения.

Показатель эффективности  $k$ -го варианта плана формирования транспортных потоков ЖС определяется в соответствии вектором  $\|Y_k\|$ , включающем:

– среднее время перемещения вагонов (составов) из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения  $\overline{TV}_{oif}(\overline{TS}_{oif})$ ;

– суммарное время простоя вагонов (составов) на сортировочных и промежуточных станциях при их перемещении из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения  $\overline{TV}_{cmij}(\overline{TS}_{cmij})$ ;

– грузонапряженность ЖС, которая является показателем уровня загрузки сети объемом транспортной работы и вычисляется по формуле  $\Gamma = \sum_{ij \in U} l_{ij} p_{ij} / \sum_{ij \in U} l_{ij}$ , где  $p_{ij}$  – величина перевезенного груза по участку ЖС;

– показатель затрат при перемещении составов по ЖС  $F = \sum_{ij \in U} sd_{ij} + \sum_{i \in N} sf_i$ , где

$sd_{ij} = q_{ij} \cdot l_{ij} \cdot n_{cij}$  – стоимость перемещения составов по ветви сети,  $sf_i = q_i \cdot n_{ci}$  – стоимость обслуживания составов на станциях,  $n_{cij}$  – количество составов пропущенных по линии  $ij$ ,  $n_{ci}$  – количество составов, обслуженных на станции  $i$ .

Случайное время формирования составов на станциях, различные стратегии организации доставки грузов, большое количество параметров ЖС обуславливает вероятностный характер реализации процесса доставки грузов для различных направлений, что не позволяет

решить задачу оценки эффективности плана формирования составов аналитическими методами и определяет актуальность использования имитационного моделирования.

**Имитационное моделирование узла железнодорожной сети.** Имитационная модель узла ЖС предназначена для исследования технологического процесса переработки транзитного вагонопотока на железнодорожной сортировочной станции.

Процесс переработки транзитного вагонопотока реализуется последовательностью следующих операций: прием перерабатываемых поездов, их подготовка к расформированию, расформирование, накопление составов новых назначений, их формирование, подготовка к отправлению и отправление. Для выполнения перечисленных операций предназначены функционально взаимодействующие элементы сортировочной системы: входные участки (ВхУ); парк прибытия (ПП); горка (Г); сортировочный парк (СП); вытяжки формирования (ВФ); парк отправления (ПО); выходные участки (ВыхУ). Рабочей нагрузкой для сортировочной системы является перерабатываемый поток вагонов. Построение ИМ узла ЖС включает ряд этапов.

На первом этапе создания модели технологический процесс сортировки вагонопотока, включающий перечисленные операции, представляется в виде иерархического графа. Узлами иерархического графа являются переходы от одной технологической операции или группы технологических операций к другой. Ветвями иерархического графа являются сами технологические операции.

Второй этап создания модели предполагает составление сетевого графика с элементами СМО. Вершинами сетевого графика являются процедуры, отражающие свершение событий начала и конца указанных технологических операций (СНК). Под ребрами понимаются сами технологические операции. Процедуры СНК предназначены для выполнения при имитации следующих функций: определения последовательности выполнения технологических операций; сбора статистической информации о ходе имитации; выполнения операций, связанных с распределением необходимых ресурсов. Элементами СМО при описании технологического процесса являются ресурсы (индивидуальные и коллективные), необходимые для проведения технологических операций.

На третьем этапе реализуется непосредственно моделирование процесса переработки вагонопотока. Параметрами оценки работы сортировочной станции являются следующие статистики:

- число отправленных вагонов в единицу времени ( $n_{отп}$ ), число принятых вагонов в единицу времени ( $n_{прин}$ ), вагонооборот в единицу времени ( $BO$ );
- время (стоимость) формирования состава в пункте отправления груза ( $t_{иф}, q_{иф}$ ); время (стоимость) расформирования/формирования сборного состава на промежуточных сортировочных станциях ( $t_{ир}/t_{иф}, q_{ир}/q_{иф}$ ); время (стоимость) расформирования состава в пункте назначения груза ( $t_{ир}/q_{ир}$ ); время (стоимость) обслуживания на сортировочной станции сквозного состава ( $t_{итр}/q_{итр}$ );
- коэффициенты использования ресурсов индивидуального пользования ( $\eta_{ind}$ ) и коллективного пользования ( $\eta_{ind}$ ).

**Имитационное моделирование функционирования железнодорожной сети.** Алгоритм ИМ ЖС реализуется последовательностью следующих шагов:

Шаг 1. По функциям распределения  $R_i(\tau)$  для каждой станции определяются интенсивности ( $\lambda_i$ ), в соответствии с которыми происходит генерация информационных транзактов, имитирующих вагоны на станциях отправления грузов. Для транзактов задаются переменные, определяющие станцию отправления ( $vst_o$ ), тип вагона ( $tv$ ), массу вагона вместе с грузом ( $mv_g$ ). Выбор пункта назначения вагона ( $vst_n$ ) определяется путём использования метода Монте-Карло в соответствие с заранее заданными вероятностями  $\|p_i\|$ .

Шаг 2. В соответствии с планом формирования поездов определяется маршрут следования вагона к пункту назначения и определяется состав, в который он будет включён. Составы в имитационной модели представлены в виде сложных транзактов, которые включают множество информационных транзактов и имеют свои параметры.

Шаг 3. Для составов на станциях отправления задаются следующие переменные: тип состава ( $ts$ ); количество вагонов ( $nv$ ); тип локомотива ( $tl$ ); станция отправления ( $st_o$ ); станция назначения ( $st_n$ ); время формирования состава в пункте отправления груза ( $t_{\phi}$ ).

Шаг 4. После завершения процесса формирования состав перемещается в заданном направлении до очередной станции ЖС. Время перемещения состава по участку сети определяется величиной  $t_{ij} = l_{ij} / v_{cij}$ , где  $v_{cij}$  – скорость перемещения состава по дороге ЖС от  $i$ -ого узла к  $j$ -тому, значение которой разыгрывается в процедурах метода Монте-Карло по функции распределения  $F_c(v)$ .

Шаг 5. При поступлении состава на очередную станцию задержкой имитируется его обслуживание. На промежуточной станции время задержки состава составляет  $t_{\text{тр}}$  условных единиц. Для сортировочной станции время задержки определяется по типу состава. Сборный состав поступает на расформирование, которое реализуется с задержкой  $t_{\text{р}}$ . Из полученных в результате расформирования вагонов и вагонов, загруженных на рассматриваемой сортировочной станции происходит формирование новых составов с временными задержками  $t_{\text{ф}}$ . Сквозные составы проходят техническое обслуживание с временной задержкой  $t_{\text{тр}}$ . Если состав прибыл на конечную станцию, происходит его расформирование с задержкой  $t_{\text{р}}$ , после чего происходит освобождение подвижного состава. Все перечисленные временные интервалы являются случайными величинами, и вычисляются по статистикам моделирования соответствующих сортировочных станций.

Шаг 6. Организуется подсчет статистик моделирования для очередного прогона ИМ. Нарастивается номер ИЭ и реализуется переход на шаг 1. Окончательные отклики моделирования вычисляются по результатам серии ИЭ и усреднения данных по выборке заданного объема.

В процессе реализации ИЭ с моделью возможно рассмотрение участковой стратегии организации составов, которая предусматривает формирование поездов только до ближайших сортировочных станций, и варианта организации составов с назначениями, когда для каждого состава выделяется самостоятельное назначение. Рассмотрение промежуточных вариантов позволит выбрать наилучший из них, обеспечивающий максимальное значение показателя эффективности плана формирования.

**Заключение.** Использование имитационного моделирования ЖС для оценки эффективности плана формирования транспортных потоков ЖС позволит проводить проверку построенных планов и определять потребность в ресурсах еще до этапа внедрения этих планов.

**Abstract.** The problem of the estimation of the efficiency of the plan to form transport streams of railway network by means of simulation modeling is considered in the paper.

### 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. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. –М.: Радио и связь, 1983. – 230 с.