

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ

---

**Abstract:** *The usage of a complex of railway network imitation models is stated. It functions in the situation of random influences and it is used for finding probable characteristics of railway steams service on condition that the plan of the train formation is fulfilled.*

**Key words:** *imitation models, railway network, the plan of the train formation.*

**Аннотація:** *Запропоновано використовувати комплекс імітаційних моделей залізничної мережі, яка функціонує в умовах випадкових дій, для знаходження імовірносних характеристик обслуговування транспортного потоку при умові виконання плану формування составів.*

**Ключові слова:** *імітаційні моделі, залізнична мережа, план формування составів.*

**Аннотация:** *Предлагается использовать комплекс имитационных моделей железнодорожной сети, функционирующей в условиях случайных воздействий, для нахождения вероятностных характеристик обслуживания транспортного потока при условии выполнения плана формирования составов.*

**Ключевые слова:** *имитационные модели, железнодорожная сеть, план формирования составов.*

### 1. Введение

Функционирование железнодорожной сети (ЖС) реализуется в соответствии с утверждённым планом формирования составов (ПФС). ПФС включает 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 представляет собой решение многовариантной математической, технологической и экономической задачи, целью которого является оптимизация продвижения транспортных потоков. Ни один из аналитических методов при большом числе станций в ЖС не гарантирует нахождение оптимального ПФС. В результате расчетов получается, как правило, ПФС, близкий по показателям к оптимальному [1]. Приблизиться в определенной степени к нахождению наиболее эффективного ПФС ЖС возможно при помощи метода, основанного на сочетании процедуры Монте-Карло и модифицированного алгоритма Форда-Фалкерсона [2], позволяющего определить интегральный максимальный поток и его распределение в сети, обеспечивающее минимальные суммарные затраты на перемещение транспортных средств.

Случайное время формирования составов на станциях, различные стратегии организации доставки грузов, большое количество параметров ЖС определяют вероятностный характер функционирования сети. Поэтому имитационное моделирование [3] процесса функционирования ЖС для установленного ПФС 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 обслуживания транзитного транспортного потока. Для

анализа эффективности вариантов организации перевозочного процесса при условии выполнения установленного ПФС, реализуемого в условиях случайных воздействий, предлагается использовать ИМ всей ЖС.

## **2. Имитационная модель узла железнодорожной сети**

ИМ узла ЖС позволяет исследовать процесс переработки транзитного вагонопотока на железнодорожной сортировочной станции, который реализуется последовательностью следующих операций: прием 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; парк прибытия; горка; сортировочный парк; вытяжки формирования; парк отправления; выходные участки.

Рабочей нагрузкой для сортировочной системы является поток вагонов, организованных в составы. Предполагается, что составы могут быть двух типов: сборными и сквозными. Сквозные составы состоят из вагонов, у которых пункты назначения совпадают. Они формируются в том случае, когда запланированы крупные перевозки в адрес одной станции назначения. Сборные поезда включают вагоны с различными пунктами доставки груза, для которых направления следования определены согласно установленному ПФС и совпадают. Для сборных поездов реализуются процессы формирования/расформирования на промежуточных сортировочных станциях от пункта отправления и пункта назначения.

На первом этапе создания модели технологический процесс сортировки вагонопотока, включающий перечисленные операции, представляется в виде иерархического графа. Узлами графа являются переходы от одной технологической операции к другой. Ветвями иерархического графа являются сами технологические операции. Каждую технологическую операцию можно, в свою очередь, представить в виде аналогичного графа. Выполнение очередной операции не может быть начато раньше, чем закончатся предшествующие для неё операции или не будут выполнены определённые условия.

Второй этап создания модели предполагает составление сетевого графика с элементами систем массового обслуживания (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 связей между технологическими операциями; сбора статистической информации о ходе имитации; выполнения операций, связанных с распределением необходимых ресурсов.

Элементами СМО при описании технологического процесса являются ресурсы, необходимые для проведения технологических операций. Рассматриваются три типа ресурсов: путевые; маневровые; бригады исполнителей. Все ресурсы являются дискретными, то есть захватывается, передается и освобождается полностью некоторое число единиц ресурса. При имитации отражается конкуренция технологических операций за ограниченный состав ресурсов.

На третьем этапе выполняется моделирование процесса переработки вагонопотока, которое реализуется в соответствии с транзактно-процессным способом имитации [3]. Реализация технологических операций имитируется процессами. В качестве транзакта выступает сложный составной транзакт (ССТ), представляющий состав, на каждом уровне которого содержится определенная информация. ССТ имеет три уровня представления: информационный транзакт – имитатор вагона; кортеж – имитатор группы вагонов с одинаковым назначением в плане формирования; состав – имитатор состава поезда.

Обслуживание составов технологическими операциями производится в соответствии с информацией, находящейся в «теле» ССТ. Для каждого ССТ указываются вероятность выбора очередной технологической операции ( $\|p_k\|$ ), объёмы ресурсов различных типов, необходимых для обслуживания ССТ технологическими операциями ( $\|vr_i^k\|$ ,  $i$  – тип ресурса,  $k$  – номер технологической операции), время и стоимость выполнения технологических операций ( $\|t_{TXOk}\|$  и  $\|q_{TXOk}\|$ ,  $k$  – номер технологической операции).

Таким образом, для имитации работы сортировочной станции необходимо определить состав и последовательность выполнения технологических операций  $\{TXO_k\}$ , где  $k = 1, \dots, K$  ( $K$  – количество рассматриваемых технологических операций), задать число входов/выходов исследуемой станции ( $vs$ ) и описать состав и количество ресурсов ( $\|r_i\|$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ), необходимых для выполнения различных технологических операций. Параметрами описания составов, образующих нагрузку на узел, являются: тип состава ( $ts$ ); номер входа на станцию ( $n\_inp$ ); число групп вагонов с одинаковым назначением в составе ( $n\_gr$ ); число вагонов в группах ( $n\_vg$ ). При задании значений параметров моделирования учитываются особенности станции и используется статистика процесса переработки транзитного вагонопотока.

Вариант организации работы сортировочной станции оценивается следующими статистиками, полученными в результате имитационных экспериментов (ИМ) с моделью:

– время/стоимость формирования состава в пункте отправления груза  $(t_\phi)/(q_\phi)$  для различных выходов; время/стоимость расформирования/формирования сборного состава  $(t_p/q_p)/(t_\phi/q_\phi)$  для различных входов/выходов; время/стоимость расформирования состава в пункте назначения груза  $(t_p)/(q_p)$  для различных входов; время/стоимость обслуживания на сортировочной станции сквозного состава  $(t_{mp})/(q_{mp})$ ;

– число отправленных вагонов в единицу времени ( $n_{отп}$ ), число принятых вагонов в единицу времени ( $n_{прин}$ ), вагонооборот в единицу времени (VO);

– коэффициенты использования ресурсов различных типов ( $\|\eta_{r_i}\|$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ).

### 3. Имитационная модель 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 составы, включающие вагоны сортировочной станции и вагоны с прилегающих промежуточных станций, которые должны быть отправлены согласно пункту назначения.

Станции ЖС описываются следующими параметрами:

- типом станции  $(r_i)$ ;
- количеством вагонов  $(nv_i)$ ;
- количеством локомотивов  $(nl_i)$ ;
- интенсивностью поступления вагонов на формирование  $(\lambda_i)$ ;
- вектором вероятностей выбора пункта назначения вагона  $(\|p_i\|)$ .

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  $j$ -ый узел  $(g_{ij})$ .

Пропускная способность железнодорожной линии характеризует мощность железнодорожной линии – это то максимальное число поездов, которое может быть пропущено по линии за единицу времени. 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  $j$ -ый 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  $j$ -ый 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. Вагоны описываются следующими параметрами:

- станцией отправления ( $vst_o$ );
- станцией назначения ( $vst_n$ );
- типом вагона ( $tv$ );
- массой вагона вместе с грузом ( $mv_g$ ).

Параметрами составов являются:

- тип состава ( $ts$ );
- количество вагонов ( $nv$ );
- тип локомотива ( $tl$ );
- станция отправления ( $st_o$ );
- станция назначения ( $st_n$ );
- время/стоимость формирования состава в пункте отправления груза ( $t_\phi$ )/( $q_\phi$ );
- время/стоимость расформирования/формирования сборного состава ( $t_p / q_p$ )/( $t_\phi / q_\phi$ ) на сортировочных станциях;
- время/стоимость расформирования состава в пункте назначения груза ( $t_p$ )/( $q_p$ );
- время/стоимость обслуживания на сортировочной станции сквозного состава ( $t_{mp}$ )/( $q_{mp}$ );
- время/стоимость обслуживания состава на промежуточной станции ( $t_{np}$ )/( $q_{np}$ ).

Временные задержки ( $t_\phi$ ), ( $t_p$ ), ( $t_{mp}$ ) определяются по функциям распределения  $F(\tau_\phi)$ ,  $F(\tau_p)$ ,  $F(\tau_{mp})$ , полученным в результате экспериментов с ИМ сортировочной станции.

Перемещение транспортных потоков в ЖС реализуется в соответствии с утверждённым ПФС, для которого однозначно определяется маршрут перемещения транспортных единиц из пункта отправления в пункт назначения. ПФС задаётся трёхмерной матрицей  $PF = \|m_{ijk}\|$ , где  $i$  – номер пункта отправления,  $j$  – номер пункта назначения,  $k$  – промежуточные станции на пути из пункта  $i$  в пункт  $j$ .

В результате проведения ИЭ с моделью определяются значения вероятностных характеристик  $h$ -го варианта организации функционирования ЖС, полученные усреднением:

- времени перемещения составов из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения

$$\bar{Y}_{1h} = \|\overline{TD}_{hij}\|;$$

– времени простоя составов на сортировочных и промежуточных станциях при их перемещении из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения  $\bar{Y}_{2h} = \|\overline{TO}_{hij}\|$ ;

– коэффициента загрузки участков дорог ЖС  $\bar{Y}_{3h} = \|\overline{\eta d}_{hij}\|$ ;

– коэффициента загрузки узлов ЖС  $\bar{Y}_{4h} = \|\overline{\eta o}_{hi}\|$ ;

– стоимости перемещения составов из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения  $\bar{Y}_{5h} = \|\overline{Q}_{hij}\|$ , где значения  $\overline{Q}_{hij} = \sum_{ij \in U} \overline{sd}_{hij} + \sum_{i \in N} \overline{sf}_{hi}$ ,  $\overline{sd}_{hij}$  – средняя стоимость перемещения

составов по ветви сети,  $\overline{sf}_{hi}$  – средняя стоимость обслуживания составов на станциях;

– грузонапряженности ЖС, которая является показателем уровня загрузки сети объемом транспортной работы и вычисляется по формуле  $\bar{Y}_{6h} = \sum_{ij \in U} l_{ij} \overline{p}_{hij} / \sum_{ij \in U} l_{ij}$ , где  $p_{hij}$  – масса перевезенного груза по участку ЖС.

Алгоритм ИМ 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 транзактов, имитирующих вагоны на станциях отправления грузов. Для транзактов задаются шифр станции отправления ( $vst_o$ ), типа вагона ( $tv$ ), массы вагона вместе с грузом ( $mv g$ ). По вектору вероятностей  $\|p_i\|$  определяется шифр станции назначения ( $vst_n$ ).

Шаг 2. В соответствии с ПФС ( $PF = \|m_{ijk}\|$ ) определяются маршрут следования вагона к пункту назначения и состав, в который он будет включён. Составы в ИМ представлены в виде ССТ.

Шаг 3. Для составов на станциях отправления задаются значения типа состава ( $ts$ ); количества вагонов ( $nv$ ); типа локомотива ( $t l$ ); станции отправления ( $st_o$ ); станции назначения ( $st_n$ ). По заданному количеству вагонов и типу локомотива определяются границы изменения скорости перемещения состава по участкам сети.

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 находится 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  $t_{np}$  условных единиц. Для сортировочной станции время задержки определяется по типу состава. Сборный состав поступает на расформирование/формирование, которое реализуется задержками  $t_p / t_\phi$ .

Сквозные составы проходят техническое обслуживание с временной задержкой  $t_{mp}$ . Если состав прибыл на конечную станцию, происходит его расформирование с задержкой  $t_p$ , после чего происходит освобождение подвижного состава.

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

В процессе проведения ИЭ с моделями возможно рассмотрение участковой системы организации составов, которая предусматривает формирование поездов только до ближайших сортировочных станций, и варианта организации составов с назначениями, когда для каждого состава выделяется самостоятельное назначение.

#### 4. Выводы

С помощью описанных ИМ исследователи могут решить следующие задачи проектного моделирования:

- оценить эксплуатационные и экономические характеристики функционирования ЖС для различных систем организации составов при условии выполнения установленного ПФС;
- определить “узкие места” ЖС в условиях реализации установленного ПФС, устранение которых позволит увеличить пропускную способность сети с минимальными затратами;
- решить задачу распределения нагрузки на ЖС, при которой сеть функционирует ритмично и равномерно загружены все её участки.

Причём согласованная работа ИМ позволит учесть при моделировании всей сети особенности функционирования различных сортировочных станций ЖС и определить структуру интегрального транспортного потока в сети с учётом этих особенностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / Под ред. П.С. Грунтова. – М.: Транспорт, 1994. – 543 с.
2. Максимей И.В. и др. Использование имитационного моделирования для нахождения интегрального максимального потока в транспортной сети региона / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage&Processing). – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 49– 58.
3. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1983. – 230 с.

*Стаття надійшла до редакції 23.06.2008*