

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ**

**Abstract:** Use of means of automation of simulation of a railway system is offered. The technique of the decision of the typical problems is described, allowing to define the most effective variant of service of transport streams.

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

**Анотація:** Пропонується використання засобів автоматизації імітаційного моделювання залізничної мережі. Описується методика вирішення типових завдань, що дозволяють визначити найбільш ефективний варіант обслуговування транспортних потоків.

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

**Аннотация:** Предлагается использование средств автоматизации имитационного моделирования железнодорожной сети. Описывается методика решения типовых задач, позволяющих определить наиболее эффективный вариант обслуживания транспортных потоков.

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

### **1. Введение**

Функционирование железнодорожной сети (ЖС) реализуется с учётом имеющихся ресурсов подвижного состава, перерабатывающей мощности сортировочных станций и наличия путевых ресурсов, соединяющих станции. Для обеспечения 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.

Перемещение транспортных потоков от мест отправления до мест назначения реализуется в соответствии с графиком движения поездов, который разрабатывается с учётом планируемых объёмов перевозок и маршрутных линий плана формирования составов (ПФС). Однако наличие множества динамически изменяющихся параметров функционирования сети приводит к возникновению локальных сбоев, которые очень быстро распространяются на всю сеть и влияют на время (стоимость) доставки грузов.

Для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками в ЖС необходимо учитывать как статические параметры организации сети, так и всё множество её вероятностных параметров, включающих характеристики планируемых перевозок, разнообразные варианты перемещения и множество внешних факторов, влияющих на динамику функционирования сети.

Попытки решения столь сложной и многоаспектной задачи с помощью детерминированных алгоритмов не обеспечивают достаточную степень детализации исследования и не дают возможности учитывать вероятностную природу работы железнодорожной системы. В результате чего общее качество таких моделей оказывается неудовлетворительным [1]. В данной работе предлагается преодолевать вышеизложенные трудности посредством имитационного моделирования [2].

Автоматизация процесса имитационного моделирования ЖС организуется путём использования параметризованных моделей ЖС разного уровня детализации и технологического

обеспечения, адаптированного для обработки и анализа результатов моделирования транспортных систем. Модели реализованы с использованием системы моделирования MICIC4 [3]. Технологическое обеспечение является частью комплекса автоматизации имитационного моделирования транспортных систем [2] и включает подсистему испытания и исследования свойств имитационной модели (ИМ) (ISPT), подсистему оптимизации и принятия решений (OPTIM), подсистему отображения результатов моделирования (VIZ). Согласованная работа моделей обеспечивается путём использования общей информационной базы данных, в которой хранятся исходные данные и накапливаются статистические данные, позволяющие вычислить отклики имитации.

В статье даётся описание имитационных моделей ЖС и приводится методика решения типовых задач, позволяющих определить наиболее эффективный вариант обслуживания транспортных потоков с учётом вероятностного характера их планирования и множества траекторий реализации транспортного процесса.

## 2. Имитационная модель сортировочной станции

Имитационная модель сортировочной станции IM\_JST предназначена для исследования доминирующей технологической линии процесса переработки транзитного вагонопотока, который может быть представлен в виде иерархического графа  $G\_TXO(L, W)$ , узлами которого являются технологические операции  $\{L\}$ , а ветвями – переходы от одной технологической операции (ТХО) к другой  $\{W\}$ . В вершинах графа вызываются специфические процедуры, которые не имеют продолжительности в модельном времени и выполняют при моделировании следующие функции: определяют последовательность выполнения ТХО; фиксируют статистическую информацию; выполняют операции, связанные с распределением ресурсов.

Входной транзитный вагонопоток образуют составы, формализованные в виде сложных составных транзактов (ССТ), которые, поступая на станцию, разбиваются на вагоны и группы вагонов, 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 транзитного вагонопотока каждая технологическая операция из множества  $\{TXO_j, j = \overline{1, L}\}$  для обслуживания ССТ на время её реализации запрашивает следующие ресурсы: путевые ресурсы ( $\alpha_{ij}$ ); ресурсы маневровых локомотивов ( $\gamma_{ij}$ ); ресурсы бригад исполнителей ( $\lambda_{ij}$ ). 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.

Работа модели основана на транзактно-процессном способе имитации, при котором составы представляются ССТ, а выполнение технологических операций имитируется процессами.

В  $l$ -ой реализации каждому процессу выделяются ресурсы сортировочной станции на время обслуживания технологической операцией очередного транзакта, которое имитируется временной задержкой. Предполагается, что перед выполнением любой ТХО вначале имитируются запросы на ресурсы сортировочной станции и только после их выделения имитируется выполнение ТХО. Перед выполнением операции фиксируется статистика расхода ресурсов  $(\sum_i \alpha_{ij}; \sum_i \gamma_{ij}; \sum_i \lambda_{ij})$  для реализации очередной  $TXO_j$ . После завершения выполнения ТХО ресурсы освобождаются и могут быть использованы при реализации следующей ТХО. Временная задержка и стоимость выполнения  $TXO_j$  разыгрываются по функциям распределения  $F_j(\omega)$  и  $F_j(\xi)$  соответственно. Причем из-за конкуренции ТХО за ресурсы сортировочной станции время и стоимость могут быть существенно больше разыгранных по функциям распределения значений.

Вектор входных параметров  $h$ -го варианта моделирования  $G\_TXO_h$  включает граф технологического процесса переработки входящего вагонопотока; функции распределения времени выполнения и стоимости выполнения технологических операций; вероятности переходов между ТХО; число видов ресурсов исследуемой станции; вектор объёма ресурсов различных видов исследуемой станции; матрицу объёма ресурсов различных видов, необходимых для выполнения технологических операций; число входов/выходов исследуемой станции; число видов составов; вектор, определяющий структуру потоков, поступающих на станцию с различных входов; вектор, определяющий структуру потоков, формируемых на станции для различных выходов; вектор, определяющий интенсивность поступления составов на сортировочную станцию с различных входов; параметры вагонов; параметры составов.

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; перерабатывающая способность станции; число отправленных вагонов (составов) в сутки; число принятых вагонов (составов) в сутки; время/стоимость формирования состава для каждого выхода; средний простой вагона по выделенным технологическим цепочкам; коэффициенты загрузки ресурсов.

### 3. Имитационная модель железнодорожной сети

ИМ всей железнодорожной сети IM\_JS позволяет определить вариант распределения нагрузки и ресурсов ЖС, обеспечивающий минимизацию времени и затрат на транспортировку единицы груза. Структура ЖС представляется в виде графа  $G(N, U)$ , узлами которого являются сортировочные станции  $\{N\}$ , а рёбрами – участки дорог  $\{U\}$  между станциями. На сортировочных станциях происходит обслуживание составов, поступающих с различных станций ЖС, и их переформирование с учётом вагонов, поступающих с местных промежуточных станций, которые должны быть отправлены согласно пункту назначения. Маршруты перемещения составов по участкам дорог ЖС определяются в соответствии с утверждённым ПФС, параметры которого

учитываются при моделировании. Рассматриваются грузовые транспортные поездотоки, которые определяют нагрузку на ЖС и конкурируют за ресурсы сети.

Основными компонентами ИМ ЖС являются генератор транзактов ( $GEN_i$ ); транзакт ( $TR_j$ ); сложный составной транзакт ( $STR_n$ ); имитатор участка дороги, представленный многоканальным устройством MICIC4 ( $JD_k$ ); узел ЖС ( $YZ_i$ ), представляющий собой составное устройство MICIC4, включающее набор устройств, отображающих переформирование транзактов на сортировочных станциях; поглотитель транзактов (POGL<sub>i</sub>).

Генератор отображает процесс поступления вагонов на сортировочные станции с прилегающих промежуточных станций. Поезда в модели представлены ССТ. Поступая на станцию, они разбиваются на вагоны (транзакты) и группы вагонов (ССТ), а затем, в соответствии с назначением (ПФС), собираются в новые составы. Перемещение поездов по участкам сети отображается в модели путём обслуживания ССТ многоканальными устройствами, обеспечивающими параллельное обслуживание множества транзактов. Работа устройств  $JD_k$  синхронизирована в модельном времени и позволяет отразить одновременное перемещение транспортных единиц в различных направлениях.

Перечисленные статические компоненты (генератор, устройство, узел) описывают однотипные по функционированию элементы, представленные в модели версиями. Динамические элементы модели, то есть транзакты, имеют множество копий. При этом элементы одного и того же компонента модели совпадают по набору параметров и процессу, но различаются по конкретным значениям.

Обслуживание грузового транспортного потока ЖС в узлах сети  $YZ_i$  предполагает реализацию следующих операций: приём вагонов, поступивших с промежуточных станций; прием поездов, прибывших со смежных сортировочных станций ЖС; построение списков станций, определяющих маршруты следования вагонов, поступивших с промежуточных станций; распределение вагонов на пути формирования составов, которые определяются пунктами их назначения; формирование новых составов из местных вагонов и вагонов, поступивших с других станций в составе поездов; выбор подходящего локомотива для накопленных составов; отправление поездов со станций.

Алгоритм обслуживания ССТ в узле реализуется последовательностью следующих шагов. Прибытие ССТ в узел  $YZ_i$  активизирует поиск свободного пути для его обслуживания (переформирования). Далее реализуется проверка условия окончания обслуживания транзактов, составляющих ССТ. Транзакты, имеющие параметр станции назначения, совпадающий с номером версии  $YZ_i$ , поглощаются (пополняют парк порожних вагонов станции), а оставшиеся участвуют в процессе переформирования и поступают на соответствующие обслуживающие устройства (пути формирования). В процессе формирования новых ССТ анализируется узел назначения транзактов, и в соответствии с ПФС определяется номер обслуживающего устройства (пути формирования) и маршрут его перемещения по ЖС. Если ССТ в данном направлении уже формируется, то транзакт добавляется в его конец. В противном случае активизируется начало формирования нового ССТ,

для которого определяется вид состава. Информация обо всех ССТ, обслуживающихся устройствами ИМ ЖС, сохраняется и корректируется в базе данных модели на каждом шаге имитации.

Вектор параметров  $k$ -го варианта моделирования ( $G_k$ ) образуют следующие величины: граф исследуемой железнодорожной сети; план формирования составов; число входов/выходов для множества сортировочных станций; матрица пропускных способностей; матрица стоимости перемещения вагона по участку дороги единичной длины; матрица длин участков ЖС; число видов составов, составляющих транспортный поток; матрица, определяющая структуру поездопотоков; матрица, определяющая интенсивность поступления составов в ЖС; матрицы времени/стоимости обслуживания составов на сортировочных станциях, элементами которых являются функции распределения времени/стоимости обслуживания составов на сортировочных станциях ЖС, полученные с помощью ИМ\_JST; параметры вагонов; параметры составов.

Вектор откликов моделирования  $Y_k$ , полученный обработкой статистических данных, включает средние значения времени перемещения, стоимости, пройденного расстояния вагонов из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения в условиях рассматриваемого ПФС; реализованной пропускной способности при перемещении из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения; суммарного времени простоя вагонов на сортировочных станциях при их перемещении из  $i$ -го пункта отправления в  $j$ -ый пункт назначения; грузонапряженности ЖС.

#### **4. Методика определения эффективных вариантов организации перемещения транспортных потоков в железнодорожной сети**

С целью нахождения эффективного варианта функционирования ЖС предлагается использовать методику, основанную на использовании описанных средств автоматизации имитационного моделирования ЖС. Методика реализуется итеративно и включает поэтапное решение типовых задач имитационного моделирования путём согласованной работы имитационных моделей ЖС.

На первом этапе предполагается проведение исследований с целью оптимизации параметров работы сортировочных станций. Для этого используется ИМ\_JST и решаются следующие типовые задачи: подбор состава и объёма ресурсов (определение запаса ресурсов) сортировочных станций; выбор структуры технологического процесса переработки вагонопотока; определение состава эвристических управляющих правил, повышающих пропускную способность станции.

Задача 1. Своевременное выделение ресурсов сокращает время обслуживания составов на сортировочной станции и увеличивает показатели её пропускной и перерабатывающей способностей. При оценке перерабатывающей способности станции для установившегося поездопотока проводится серия имитационных экспериментов (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 обслуживания транспортного потока анализируется вектор откликов  $Y_h = f(V_h, R_h)$ , где  $R_h$  – вектор структуры

запросов  $h$ -го варианта реализации процесса переработки вагонопотока множеством технологических операций, а  $V_h = (\alpha_{ih}, \gamma_{ih}, \lambda_{ih})$  – вектор  $h$ -го варианта объёма ресурсов (путевых ресурсов, маневровых локомотивов, бригад исполнителей). Выбирается тот вариант состава и распределения ресурсов, который обеспечивает максимальное значение перерабатывающей способности, при условии, что остальные отклики находятся в допустимых пределах.

**Задача 2.** Многовариантность организации технологического процесса переработки транспортного потока определяется тремя факторами: наличием универсальных и оригинальных технологических операций; возможностью вероятностных и условных переходов между технологическими операциями; альтернативными вариантами реализации функций сортировочной станции. При выборе структуры технологического процесса переработки должны учитываться все факторы, которые определяют варианты обслуживания вагонопотока. С этой целью контролируются средние значения времени обслуживания вагонопотоков на контрольных участках станции. В случае, если на каком-либо участке сортировочной станции время обслуживания вагонопотока превышает допустимое для этого участка значение, исследуется альтернативный вариант с заменой неэффективной технологической цепочки.

**Задача 3.** Пропускная способность технологической линии переработки транспортного вагонопотока может быть значительно увеличена за счёт введения организационных мероприятий, основанных на эвристических правилах, полученных опытным путём. Такие правила определяются на этапе настройки IM\_JST и используются в процессе имитации. Они позволяют в графе технологических операций вместо детерминированных переходов использовать условные переходы. При этом организуется приоритетный выбор вагонов на их обслуживание технологическими операциями. Признаком, обеспечивающим высокий приоритет, может выступать наличие ресурсов для обслуживания вагонов технологическими операциями, а также наличие в составе группы вагонов завершающего вагона, быстрое обслуживание которого приведёт к добавлению его в соответствующий пул и завершению формирования нового состава. Эффективность использования правил может быть установлена путём проведения ИЭ и последующим анализом результатов имитации с использованием подсистемы OPTIM.

В результате решения описанных задач формируется оптимальная структура технологического процесса переработки вагонопотока, определяются состав и объёмы различных видов ресурсов, выбираются управляющие стратегии, позволяющие сократить время простоя вагонов на станциях. На основании этой информации для смежных сортировочных станций ЖС решается задача распределения вагонов, поступающих с промежуточных станций участков сети. С этой целью используются процедуры подсистемы оптимизации и принятия решений.

На втором этапе организуется проведение ИЭ на модели IM\_JS с целью выбора эффективной стратегии обслуживания транспортных потоков ЖС. С этой целью решаются следующие задачи: определение эффективных путей транспортировки грузов для утверждённого ПФС; выбор эффективных параметров ПФС.

**Задача 4.** Выбор пути следования составов однозначно определяется ПФС и при моделировании описывается массивом  $PFS$ . Имитация обслуживания транспортного потока установившейся величины и структуры при заданном объёме ресурсов ЖС для утверждённого

ПФС позволяет сделать комплексную оценку эффективности плана формирования транспортных потоков ЖС и определить наиболее выгодные направления доставки грузов.

Для оценки варианта функционирования ЖС используется комплексный показатель  $F_{JS} = (\| \overline{t_{ij}} \|, \| \overline{q_{ij}} \|, \| l_{ij} \|, \| \overline{pr_{ij}} \|, i, j = \overline{1, N})$ , включающий соответственно среднее время перемещения вагонов, среднюю стоимость доставки грузов, расстояние перемещения и среднюю реализованную пропускную способность, значения которого определяются по выборкам ИЭ усреднением соответствующих статистик моделирования. Нормирование элементов матриц их максимальным значением позволяет выделить среди анализируемых 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

$$f_{ij}^* = \delta_1 \cdot t_{ij}^* + \delta_2 \cdot q_{ij}^* + \delta_3 \cdot l_{ij}^*,$$

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

где  $\delta_i$  – коэффициенты важности откликов, позволяет сравнить пути перемещения между собой и упорядочить их по эффективности. Интегральной оценкой варианта функционирования сети

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

отражает реализуемую пропускную способность сети и эффективность организации варианта ЖС с учётом 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 направления сети и отдельные пути. Для этого используется подсистема OPTIM, автоматизирующая процесс получения решения. При этом часть нагрузки с наиболее загруженного направления может быть направлена на участок с большей пропускной способностью, обеспечивая таким образом равномерную загруженность ЖС.

**Задача 5.** Резервные возможности сети могут быть выявлены путём проведения ИЭ для различных вариантов ПФС. С этой целью рассматривается альтернативный ПФС

$PFS' = \| pfs'_{ijs} \|, i, s, j = \overline{1, N}$ . В результате проведения моделирования функционирования сети в

условиях нового ПФС формируются элементы вектора  $F'_{JS} = (\| \overline{t'_{ij}} \|, \| \overline{q'_{ij}} \|, \| l'_{ij} \|, \| \overline{pr'_{ij}} \|, i, j = \overline{1, N})$ .

Поэлементное вычитание матриц времени перемещения, стоимости доставки, расстояний и пропускной способности позволяет выявить резервы этих величин для различных сочетаний станций отправления и назначения:

$$\| rt_{ij} \| = \| \overline{t'_{ij}} \| - \| \overline{t_{ij}} \|, \quad \| rq_{ij} \| = \| \overline{q'_{ij}} \| - \| \overline{q_{ij}} \|, \quad \| rl_{ij} \| = \| l'_{ij} \| - \| l_{ij} \|, \quad \| rpr_{ij} \| = \| \overline{pr'_{ij}} \| - \| \overline{pr_{ij}} \|, \quad i, j = \overline{1, N}.$$

Суммирование элементов матриц резервов позволит оценить общий выигрыш по времени ( $RT$ ), стоимости ( $RQ$ ), расстоянию ( $RL$ ) и пропускной способности ( $RPR$ ) при переходе к альтернативному ПФС:  $RT = \sum_{ij} rt_{ij}$ ;  $RQ = \sum_{ij} rq_{ij}$ ;  $RL = \sum_{ij} rl_{ij}$   $RPR = \sum_{ij} rpr_{ij}$ .

Наконец, на третьем этапе с учётом результатов предыдущих исследований определяются рациональные параметры планируемых потоков. Типичными задачами последнего этапа являются следующие: выбор параметров потоков, определяющих их структуру и состав; определение оптимальных параметров самих транспортных единиц.

**Задача 6.** Исходными данными моделирования является информация, задающая структуру потока и интенсивность поступления составов. При этом путём изменения параметров функций распределения матрицы структуры потока для установленного ПФС возможно рассмотрение различных стратегий обслуживания транспортных единиц на сортировочных станциях. Транспортный поток, включающий только сквозные составы, обеспечит 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 позволит реализовать участковую маршрутизацию, при которой составы переформируются на каждой сортировочной станции. Рассмотрение промежуточных вариантов путём проведения ИЭ расширит выбор рационального варианта организации транспортных потоков, обеспечивающего минимальные затраты в условиях реализации максимальной пропускной способности.

**Задача 7.** Основными параметрами поездов, оказывающими влияние на процесс транспортировки, являются масса ( $ms$ ) и длина ( $lv$ ). Увеличение массы и длины поезда уменьшает интенсивность и плотность транспортного потока при неизменной реализуемой пропускной способности. Поэтому проведение ИЭ с неизменными параметрами потоков и варьируемыми параметрами поездов позволит оценить их влияние на транспортный процесс и выбрать оптимальное их сочетание.

## 5. Заключение

Автоматизация имитационного моделирования вариантов организации транспортного процесса ЖС позволит оперативно решать типовые задачи исследования сети с учётом имеющихся данных и критериев поиска решения. Выявленные при этом резервы ЖС, параметры организации процесса транспортировки грузов и планирования самих потоков позволят составить рациональный план перевозок и оценить провозную способность сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / Под ред. П.С. Грунтова. – М.: Транспорт, 1994. – 543 с.
2. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, Е.А. Ерофеева и др. // Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 147 – 153.
3. Левчук В.Д., Максимей И.В. Программно-технологические комплексы имитации сложных дискретных систем. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2006. – 63 с.

*Стаття надійшла до редакції 22.06.2009*