

УДК 681.3

**Е. А. Ерофеева**

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет транспорта»

ул. Кирова, 34, 246653 Гомель, Республика Беларусь

### **Формализация технологии обслуживания вагонопотоков сортировочной станцией при имитационном моделировании**

*Рассмотрен полигон сети железных дорог как сложная техническая система; выделены структурные элементы исследуемой сети железных дорог. Определены две основные задачи исследования функционирования сети железных дорог. На основе краткого обзора исследований в области технологии работы сортировочной станции, как опорного элемента сети железных дорог по формированию транспортного потока, приведены основные определения по организации вагонопотоков на сети железных дорог. Предложен способ формализации технологического процесса железнодорожной сортировочной станции для целей построения имитационной модели и применения ее в эксплуатационной практике.*

**Ключевые слова:** имитационная модель, сортировочная станция, сеть железных дорог, организация вагонопотоков, сложносоставной транзакт, информационный транзакт, технологическая операция, система распределения ресурсов.

### **Введение**

Полигон сети железной дороги является сложной технической системой большой размерности и состоит из ряда подсистем, таких как железнодорожные участки, направления, технические станции (грузовые, участковые, пассажирские, сортировочные) и др. Каждый узел, станцию, соединяющую их линию можно описать набором характеристик функционирования. Транспортный поток (ТП), представляет собой внешнее воздействие (нагрузку) на транспортную сеть (ТС). В общей теории ТП обычно решаются две сложные задачи. Первая состоит в определении оптимального ТП на существующей ТС или ее элементах. Когда ТП превышает оптимальное значение, ТС будет работать в режиме перегрузок с возникновением задержек, отказов и экономических потерь. При решении второй задачи

© Е. А. Ерофеева

определяется оптимальная мощность ТС для пропуска заданных или спрогнозированных ТП. Поскольку пассажирские перевозки являются перевозками по расписанию (то есть являются стационарной нагрузкой на ТС, которую можно рассчитать аналитически), то в дальнейшем нами рассматриваются только грузовые перевозки.

Нагрузкой для таких систем, как железнодорожное направление или участок, является суточный поездопоток с учетом всех категорий поездов (суточная интенсивность ТП). Для сортировочной или участковой станции нагрузкой являются суточные принимаемый транзитный и перерабатываемый поездопоток (число расформировываемых на станции поездов).

Сортировочные станции являются опорными пунктами железнодорожной сети по организации вагонопотоков в поезда и определяют основные расходы, связанные с формированием и расформированием поездов. Технологический процесс на сортировочной станции зависит от мощности и структуры ТП, входящего на станцию для его обработки и пропуска. В свою очередь показатели работы станции (такие как величина накапливаемых составов; интенсивность пропуска вагонов через станции без переработки; затраты, связанные с накоплением составов и др.) являются исходными данными для расчета *плана формирования поездов*. Таким образом, важной является задача расчета показателей работы станции при изменении входного ТП и (или) при изменении технологии работы станции.

### **Краткий обзор исследований технологии работы сортировочной станции**

Планирование работы сортировочных станций было в числе первых сфер применения ЭВМ в эксплуатации железных дорог, при этом широко используется имитационное моделирование. Одним из первых подходов к моделированию было применение аппарата формализации математической логики (алгебры предикатов). Другим подходом было представление сортировочной станции в виде композиции сопряженных агрегатов. В работах [4, 5] для формализации структуры и процессов, протекающих на сортировочной станции, было предложено использовать асинхронные вероятностные автоматы с многозначным входным и выходным алфавитом, характеризующие дискретные изменения состояний в период модельного времени. В работе [6] процесс функционирования модели сортировочной станции представляет собой композицию дискретных и непрерывных компонентов кусочно-линейного Марковского процесса. Многие исследователи для формализации функционирования сортировочной станции использовали математический аппарат систем массового обслуживания (СМО). В этих исследованиях можно выделить два подхода: имитационные модели СМО и аналитические модели СМО, при которых осуществляется декомпозиция станции на отдельные подсистемы СМО. В работе [7] предложена система имитационного моделирования технологии работы сортировочной станции, которая состоит из двух взаимосвязанных сложных СМО. Некоторые исследователи предложили интерпретацию работы сортировочной станции в виде сети СМО. Так же рассматривались аналитические модели для расчета показателей работы станции, методика расчета которых основывается на методах статистической линеаризации, используемых

в теории автоматического управления для анализа стохастических динамических систем. Однако при этом методе не учитывается взаимодействие отдельных систем СМО, что не обеспечивает адекватности функционирования СМО в целом.

Таким образом, железнодорожная станция имеет ряд следующих особенностей, затрудняющих оценку показателей ее работы при изменении тех или иных факторов: сильная связность отдельных устройств и технологических операций; влияние случайных факторов (таких как неравномерность поступления поездов на станцию, колебания времени выполнения технологических операций); влияние управления (управляющие решения зависят от состояния станции, в свою очередь управляющие воздействия влияют на показатели работы станции); влияние сложной структуры (схема путевого развития станции имеет качественные особенности, которые влияют на показатели работы). Все эти факторы трудно формализуемы. Анализ предшествующих разработок и практического опыта работников железной дороги позволяет сделать вывод о необходимости использования имитационного моделирования для решения задач организации вагонопотоков на сети железной дороги в целом и для определения показателей работы железнодорожной станции в частности.

## Основные определения

*Корреспонденцией вагонов* назовем среднесуточное (как правило, за год или месяц) число вагонов, образующихся на какой-либо из грузовых станций сети железных дорог для следования на станцию выгрузки.

*Струей вагонопотока* представим совокупность корреспонденций, образующихся на какой-либо из станций сети железных дорог, в том числе получившихся за счет слияния вагонопотоков для следования на другую станцию. В ряде случаев уже на станции погрузки образуются одна или две крупные корреспонденции, которые можно выделить в отдельные струи вагонопотока. В этих случаях сразу на станциях погрузки формируют поезда назначением на станции выгрузки, и маршрут следования поезда от станции отправления до станции назначения полностью совпадает со следованием струи вагонопотока. Однако более частым является случай, когда отдельные корреспонденции на станциях погрузки являются небольшими (несколько вагонов или десятков вагонов), и в этом случае корреспонденции образуют струи вагонопотоков до ближайшей технической станции (участковой или сортировочной).

*Планом формирования поездов* обозначим план организации груженых вагонопотоков в поезда на сети железных дорог. *План формирования* одновременно является планом распределения объема работы между сортировочными, участковыми, грузовыми и другими станциями по формированию, расформированию и пропуску поездов транзитом с учетом критерия технико-экономической целесообразности. Разработка *плана формирования* представляет собой решение многовариантной математической, технологической и экономической задач. Для расчета *плана формирования* важнейшими исходными данными являются характеристики всех *корреспонденций вагонов*.

*Назначением плана формирования* для станции является *струя вагонопотока*, образованная на станции, для следования на другую станцию, где произойдет раз-

деление *струи* и образование новых *струй*. *Планом формирования* регламентируется какие *корреспонденции вагонов* образуют конкретные назначения, для каждой сортировочной станции железнодорожной сети.

*Станцией назначения (назначением)* груженого вагона является станция выгрузки вагона.

Для порожних вагонопотоков на основе составления балансов избытка или недостатка порожних вагонов по станциям и полигонам сети составляется междо-рожная *схема регулирования порожних вагонов*. В простых случаях *схема регулирования порожних вагонов* рассчитывается на основе логического анализа вручную, а в сложных — применяются известные математические методы (например, метод линейного программирования). Результаты расчета *схемы регулирования порожних вагонов* обычно представляются графически.

Целью исследования динамики функционирования железнодорожной сети является создание такой системы организации вагонопотоков, при которой расходы, связанные с организацией поездов различных категорий и их пропуском по участкам, будут минимальными.

## Содержательное описание сортировочной станции

Представим железнодорожную сеть в виде графа сложной структуры (ГРС). В этом графе узлами будут железнодорожные станции, а дугами — железнодорожные участки, соединяющие узлы. Узлы являются источниками и поглотителями поездов, которые движутся по дугам. Под созданием поезда понимается процесс его формирования из вагонов, а уничтожение означает расформирование состава поезда на вагоны. Кроме того, поезд может проходить через узел без изменения. Основной технической характеристикой дуги определим ее пропускную способность (максимальное число поездов, пропускаемых в единицу времени в обоих направлениях). Для узла техническими характеристиками будут пропускная и перерабатывающая (максимальное число вагонов, расформировываемых на станции в единицу времени) способности, а также время ожидания накопления вагонов на состав поезда, которое зависит от входящего вагонопотока.

Железнодорожная сортировочная станция (ЖДСС) представляет собой сложный комплекс технологически взаимосвязанных элементов и операций. Технологический процесс работы сортировочной станции разделяется на следующие технологические линии обслуживания транспортного потока: пропуск всех категорий пассажирских и пригородных поездов (ТЛ1); обработка и пропуск транзитных грузовых поездов без изменения массы и длины (ТЛ2); обработка и пропуск частично перерабатываемых поездов (ТЛ3); сортировка вагонопотоков в соответствии с установленным планом формирования поездов (ТЛ4); переработка и отправление местного вагонопотока (ТЛ5). Для решения задач, связанных расчетом *плана формирования*, необходимо исследовать технологический процесс работы ТЛ4. Перечень и порядок выполнения технологических операций (ТХО), производимых на сортировочной станции Белорусской железной дороги, изложен в типовом технологическом процессе сортировочной станции [8]. Для ТЛ4 все технологические операции делятся на четыре блока в соответствии с подсистемами станции (см. таблицу).

Блоки ТХО для ТЛ4

	Блок операций	Подсистема станции
1	Обработка поезда по прибытии (ПП)	Парк прибытия
2	Расформирование состава (Г)	Пути надвига и горка
3	Накопление и формирование состава (СП)	Сортировочный парк, вытяжные пути формирования
4	Обработка поезда по отправлении (ПО)	Парк отправления

В общем виде переработку вагонопотока на ЖДСС можно представить следующим образом. Поезда, прибывшие на станцию, разбиваются на группы вагонов, которые затем накапливаются на соответствующих путях сортировочного парка. Когда на одном или нескольких путях сортировочного парка накопится достаточное для создания состава поезда число вагонов, производится формирование поезда для отправления со станции. Часть поездов формируется для отправления не по накоплению вагонов, а через заданные интервалы времени. Существуют пути сортировочного парка, на которых накапливаются вагоны определенного типа, которые затем присоединяют к составам, сформированным на других путях сортировочного парка. На рис. 1 приведена упрощенная схема сортировки вагонопотока на железнодорожной станции.

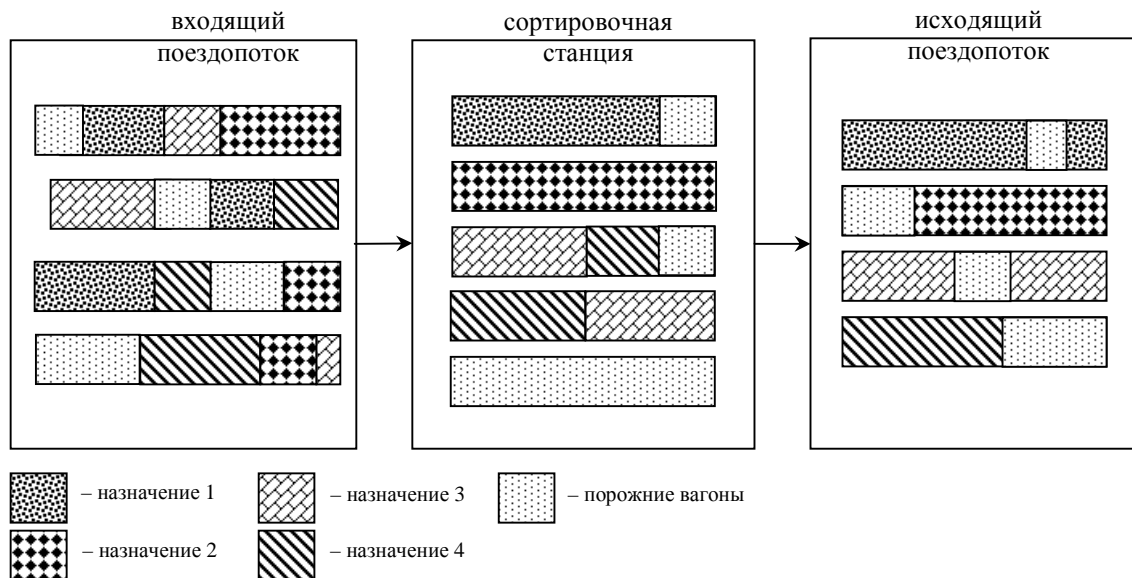


Рис. 1. Упрощенная схема сортировки вагонопотока на железнодорожной станции

Назначения, формируемые ЖДСС, определяют специализацию путей в сортировочном парке станции и регламентируются *планом формирования поездов и схемой регулировки порожних вагонов*. При составлении содержательного описания объекта моделирования были выделены три типа ресурсов: путевые (пути станции, стрелки, горловины парков), локомотивы (поездные и маневровые на

горке и вытяжных путях) и людские (бригады технического осмотра в парках, коммерческого осмотра, станционно-технологического центра и др.). Особенности путевых ресурсов является то, что один и тот же путевой ресурс может использоваться последовательно в нескольких технологических операциях (например, техническое обслуживание и коммерческий осмотр в парках). Кроме того, одна технологическая операция может использовать последовательно несколько путевых ресурсов (например, перестановка состава или надвиг на сортировочную горку).

Определены следующие цели моделирования:

- 1) определить характеристики существующей станционной технологии в зависимости от входящего потока, то есть варьируется интенсивность и(или) структура вагонопотока;
- 2) определить характеристики системы при существующем входном потоке в зависимости от технических и путевых ресурсов, то есть варьируются технические и путевые ресурсы станции.
- 3) определить характеристики системы при неизменном входящем потоке и неизменных ресурсах, меняя время выполнения технологических операций;
- 4) определить характеристики системы, изменяя назначения плана формирования для станции, не меняя при этом входящего потока и состава ресурсов.

В качестве *критериев оценки* результатов имитационного эксперимента (варианта технологии работы станции) предлагается использовать вагоно-часы простоя на станции ( $B_{st}$ ), локомотиво-часы работы на станции ( $J_{st}$ ) или другие интегральные отклики [9].

### Формализация технологического процесса сортировочной станции

На рис. 2 приведена концептуальная модель технологического процесса (ПТ) переработки вагонопотока (ПТВ) железнодорожной сортировочной станции.

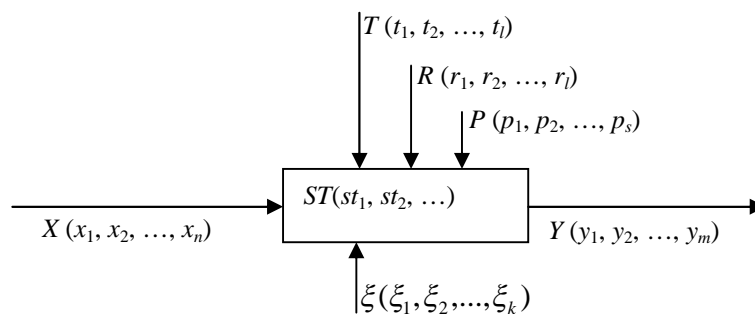


Рис. 2. Представление ПТ ПТВ ЖДСС в виде черного ящика

На рис. 2 все воздействия и отклики представлены в виде векторов:  $X(x_i)$  — входной поток;  $T(t_i)$  — множество ТХО, производимых с входным потоком;  $R(r_i)$  — ресурсы станции;  $P(p_i)$  — вектор, компонентами которого являются правила обработки входящего потока в соответствии с содержащейся в нем специфиче-

ской информацией;  $ST(st_i)$  — статистики модели;  $Y(y_i)$  — отклики модели;  $\xi(\xi_i)$  — случайный компонент технологии работы станции.

*Входной поток*  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Поезда, поступающие в расформирование на станцию, и сформированные составы поездов представлены в имитационной модели в виде сложных составных транзактов (ССТ), в которые входят: на нижнем уровне — *информационный транзакт* (*INTR* — имитатор вагона); на среднем уровне — *кортеж* (*COR* — имитатор группы вагонов с одним назначением плана формирования); на верхнем уровне — *состав* (*SET\_COR* — имитатор состава поезда).

Основным параметром состава, как и кортежа, является номер канала прибытия. Под каналом прибытия понимается железнодорожное направление прибытия поезда. Параметрами информационного транзакта являются: состояние вагона (груженный, порожний), номер канала отправления, для груженных — код назначения, для порожних — код администрации принадлежности и род подвижного состава.

*Правила*  $P(p_1, p_2, \dots, p_s)$ . Пути сортировочного парка станции, на которые производится расформирование составов и накопление вагонов на новые составы, формализованы в виде пулов (POOL). Каждый пул имеет специализацию: для груженных вагонов — вероятность отпуска на данный путь и накопление на нем вагонов, код назначения которых попадает в один из диапазонов кодов назначения пула; для порожних вагонов аналогично, но в качестве кода назначения используется совокупность — номер канала прибытия состава, код администрации принадлежности вагона и род подвижного состава. Все пулы делятся на три категории. К первой категории относится большинство пулов — это пулы, в которых происходит накопление одного назначения плана формирования. Ко второй категории относятся пулы, накопление в которых происходит на два и более назначений. К третьей категории относятся пулы, в которых не происходит формирования назначений. Транзакты из этих пулов объединяются с транзактами из других пулов для формирования состава. В технологической документации также указано, в каких пулах моментом окончания накопления является накопление определенного числа транзактов, и в каких пулах формирование составов происходит регулярно через определенные промежутки времени. На основании технологического процесса станции, плана формирования и статистических данных в имитационной модели заложены правила определения пула накопления и пула суммирования информационного транзакта по коду назначения. В соответствии с номером пула накопления информационные транзакты группируются в кортежи.

*Множество ТХО*  $T(t_1, t_2, \dots, t_l)$ . Одним из этапов формализации является составление сетевого графика технологических операций с элементами СМО (рис. 3). Событиями данного сетевого графика являются начала и концы ТХО. Под ребрами понимаются сами технологические операции. Выделены специфические процедуры начала и конца ТХО (СНК), которые выполняют в системе следующие функции: 1) определяют последовательность выполнения ТХО, исходя из специальных таблиц смежности; 2) фиксируют статистическую информацию о ходе имитации; 3) выполняют операции, связанные с распределением ресурсов.

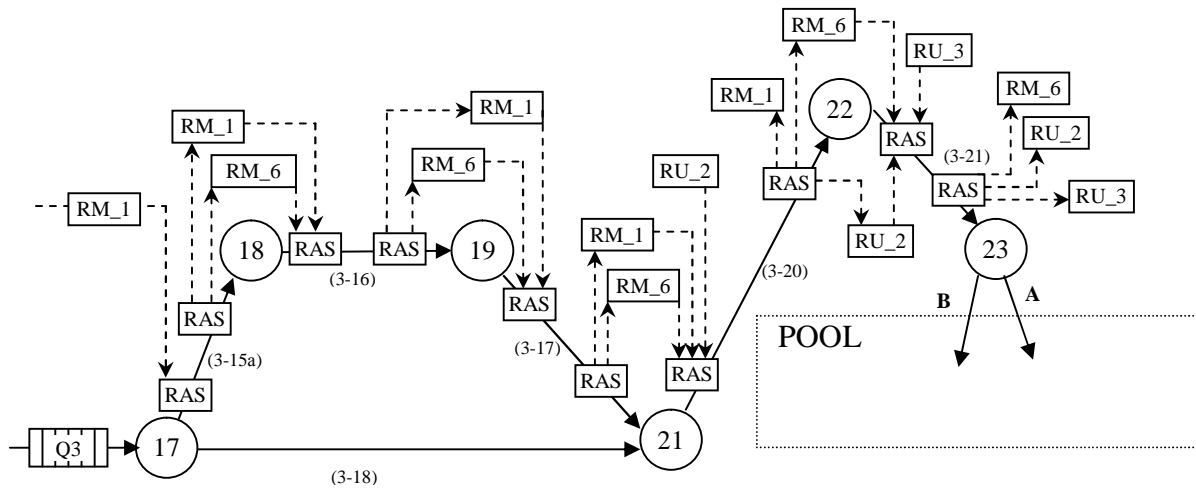


Рис. 3. Фрагмент сетевого графика TXO с указанием мест взаимодействия с системой распределения ресурсов (RAS — Resource Allocation System)

В скобках на рис. 3 обозначены номера TXO. Основным параметром TXO является время выполнения операции. Все TXO можно разделить на TXO, для выполнения которых требуются ресурсы, и TXO, для выполнения которых ресурсы не требуются.

*Ресурсы станции R ( $r_i$ ).* Все ресурсы станции (путевые, маневровые и людские) на этапе формализации делятся на два типа: неделимый ресурс, состоящий из одной единицы (RU), и ресурс, состоящий из нескольких равнозначных единиц (RM). При формализации путевых ресурсов необходимо выполнить следующие действия: 1) выделить множества  $\{TXO_k\}$ , где для выполнения  $TXO_k$  необходимо выделить путевые ресурсы станции; 2) разбить множества путевого развития станции на непересекающиеся подмножества путей (горловин, стрелок)  $\{RES_j\}$ , где  $RES_j$  — подмножество путевых ресурсов, необходимое для осуществления более чем одной  $TXO_k$ ; 3) для каждой  $TXO_k$  поставить в соответствие множество  $\{RES_j\}^k$ , где  $RES_j$  — подмножество путевых ресурсов, необходимое для осуществления данной  $TXO_k$ , с указанием для каждого  $RES_j$  порядкового номера его захвата.

На рис. 3 приведен пример взаимодействия TXO с системой распределения ресурсов (RAS) с запросами и возвращениями или передачей ресурсов. Прямоугольник RAS — точка обращения к системе RAS. В прямоугольнике  $RM_i$  либо  $RU_j$  обозначено, какой именно ресурс требует, возвращает либо передает TXO. Пунктирная стрелка, идущая в прямоугольник RAS от прямоугольника  $RM_i$  либо  $RU_j$ , означает требование ресурса у RAS, а стрелка, идущая от прямоугольника RAS, означает возвращение ресурса в RAS. Пунктирная стрелка, идущая от прямоугольника RAS одной  $TXO_k$  через некоторый ресурс к прямоугольнику RAS другой  $TXO_h$ , означает передачу ресурса  $RM_i$  от  $TXO_k$  для  $TXO_h$ .

Система распределения ресурсов (RAS) выполняет следующие операции: 1) выделение ресурса  $RES_j$  для  $TXO_k$  по запросу, если ресурс свободен; 2) установ-



ливание  $ТХО_k$  в очередь к ресурсу  $RES_j$ , если ресурс занят; 3) освобождение ресурса  $RES_j$ , возвращенного  $ТХО_k$ , если ресурс не передается; 4) передача ресурса  $RES_j$ , возвращенного  $ТХО_k$ , другой  $ТХО_h$  при необходимости.

*Статистики модели  $ST(st_i)$ .* Для расчета обобщенных статистик картежа используется время, зафиксированное в точках фиксации модельного времени. В ходе имитации фиксируются обобщенные статистики кортежей: время нахождения кортежа в системе ( $\tau_{st}$ ); время нахождения кортежа в ПП ( $\tau_{ПП}$ ); время нахождения кортежа в ПП под обработкой ( $\tau_{ПП}^{tex}$ ); время расформирования состава ( $\tau_{рф}$ ); время ожидания накопления транзактов на состав в СП ( $\tau_{СП}$ ); время нахождения кортежа в ПО ( $\tau_{ПО}$ ); время нахождения кортежа в ПО под обработкой ( $\tau_{ПО}^{tex}$ ). Кроме этого, для каждого кортежа фиксируются времена начала и конца обслуживания сложного составного транзакта (в который входит кортеж) каждой технологической операцией.

Для каждой  $ТХО$  фиксируется свой набор статистик: 1) среднее время обслуживания одного ССТ, минимальное время обслуживания одного ССТ, максимальное время обслуживания одного ССТ; 2) число обслуженных ССТ; 3) среднее время нахождения технологической операции в очереди к ресурсу (для каждого ресурса), минимальное время нахождения технологической операции в очереди к ресурсу (для каждого ресурса), максимальное время нахождения технологической операции в очереди к ресурсу (для каждого ресурса).

Для каждого ресурса также собирается своя статистика его использования: 1) число запросов (частота обращения к ресурсу); 2) время занятости ресурса; 3) время пользования ресурсом (для каждой  $ТХО$ ); 4) средняя длина очереди к ресурсу, минимальная длина очереди к ресурсу, максимальная длина очереди к ресурсу.

*Отклики модели  $Y(y_i)$ .* Выделены следующие параметры оценки технологии работы сортировочной станции: количественные — число отправленных вагонов в сутки ( $n_{отп}$ ), число принятых вагонов в сутки ( $n_{прин}$ ), среднечасовой рабочий парк вагонов ( $n_{раб}$ ), число отправленных поездов в сутки ( $N_{от}$ ), число принятых поездов в сутки ( $N_{пр}$ ); качественные — вагоно-часы простоя по подсистемам ( $B$ ), средний простой одного вагона по подсистемам ( $t$ ), параметр накопления для станции ( $C$ ) — вагоно-часы накопления, приходящиеся на один вагон состава, параметр накопления для каждого пути сортировочного парка ( $C_l$ ), коэффициенты загрузки ресурсов путевых ( $\alpha_r, \alpha_{выт}, \alpha_{пп}, \alpha_{сп}, \alpha_{по}$ ), маневровых локомотивов ( $\gamma_r, \gamma_v$ ), людских ( $\lambda_{пто}, \lambda_{пко}, \lambda_{стц}$ ).

## Заключение

Таким образом, предложен способ формализации для создания методики моделирования ТП ЖДСС, который позволит решать задачи проектного моделирования. Отметим, что все подсистемы станции в предлагаемой модели связаны и зависимы друг от друга. С помощью сложной структуры входного потока установлена гибкая связь между технологией работы станции и входящим вагонопотоком.

током. В эксплуатационной практике с помощью разработанной модели, используя ее универсальный характер, исследователи смогут выбрать рациональную организацию работ на сортировочной станции. Кроме этого, в случаях, когда необходимо будет изменить имитационную модель (ИМ), специалисты по прикладной математике смогут модифицировать ИМ, либо по предложенной методике создать новый вариант ИМ сортировочной станции. Необходимо отметить, что ИМ сортировочной станции является частью комплекса исследований по рациональной организации вагонопотоков на сети железных дорог.

1. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на ж.д. 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, 1998. — 232 с.

3. *Грунтов П.С.* Прогнозирование показателей работы сортировочных станций методом моделирования на ЭВМ / П. С. Грунтов, В. А. Захаров — Гомель: БелИИЖТ, 1981. — 60 с.

4. *Бусленко Н.П.* Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах / Н. П. Бусленко — М.: Наука. 1964. — 362 с.

5. *Курганов С.Ю.* Формализация структуры и технологических процессов сортировочных станций для построения имитационной модели ее работы / С. Ю. Курганов // В кн.: Проблемы развития железнодорожных станций и узлов. (Межвуз. сб. научных ст.). — Гомель: БелИИЖТ, 1982. — С. 75–81.

6. *Миркин А.Г.* Оперативный расчёт эксплуатационных показателей сортировочной станции // В кн.: Совершенствование эксплуатационных и экономических показателей железнодорожного транспорта: (Сб. науч. тр.). — М.: Транспорт, 1985. — С. 8–15.

7. *Лещинский Е.* Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте / Е. Лещинский; пер. с польск. — М: Транспорт, 1977. — 176 с.

8. РД РБ 09150 15.005–2003. Типовой технологический процесс работы сортировочной и участковой станций Белорусской железной дороги.

9. *Ерофеева Е.А.* Метод исследования динамики формирования поездов на основе имитации технологического процесса ж.д. станции / Е.А. Ерофеева // Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. — № 4(37). — 2006. — С. 24–28.

Поступила в редакцию 19.09.2008