

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

Функциональное моделирование работы железнодорожных станций

МОНОГРАФИЯ

ДНЕПРОПЕТРОВСК
2015

УДК 656.212

Авторы:

*В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко,
Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *Е. В. Нагорный* (Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет),
д-р техн. наук, проф. *А. В. Лаврухин* (Украинский государственный
университет железнодорожного транспорта)

Рекомендовано в печать ученым советом
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
(*протокол № 4 от 30.11.15*)

УДК 656.212

Функциональное моделирование работы железнодорожных станций [Текст]: монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин; Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2015. – 269 с.
ISBN 978-966-8471-62-9

Монография посвящена вопросам разработки функциональных моделей железнодорожных станций и их использования при выполнении исследований по совершенствованию технико-технологических параметров станций.

Для ученых, инженеров, аспирантов, студентов высших учебных заведений железнодорожного транспорта.

Ил. 64. Табл. 48. Библиогр.: 179 наим.

© В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко,
Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин,
2015

© Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп.
им. акад. В. Лазаряна, оригинал-
макет, редактирование, 2015

ISBN 978-966-8471-62-9

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ	11
1.1. Анализ методов моделирования железнодорожных станций	11
1.2. Проблемы моделирования диспетчерского управления работой железнодорожных станций	24
1.3. Концепция эргатического моделирования железнодорожных станций	28
МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ	31
2.1. Общие принципы построения и структура функциональной эргатической модели железнодорожной станции	31
2.2. Модель путевого развития станции	35
2.2.1. Назначение модели	35
2.2.2. Формализация путевого развития железнодорожных станций	36
2.2.3. Структура модели	37
2.3. Модель системы управления перемещениями объектов	42
2.3.1. Назначение модели	42
2.3.2. Структура модели	43
2.3.3. Контроль и управление стрелочными переводами	48
2.3.4. Управление светофорами и контроль маршрутов движения	49
2.3.5. Формирование маршрутов движения при ручном режиме управления	51
2.3.6. Формирование маршрутов движения при маршрутном режиме управления	54
2.3.7. Формирование списка маршрутов движения поездов и маневровых составов	58
2.4. Модель технологического процесса станции	60
2.4.1. Общие принципы построения модели	60
2.4.2. Модели обрабатываемых объектов	61
2.4.3. Формализация технологических процессов обработки объектов на станции	63

2.4.4. Управление процессом обслуживания объектов при моделировании	67
2.4.5. Порядок формализации технологического процесса обслуживания поездов на основе детерминированного конечного автомата	74
2.4.6. Моделирование перемещений подвижного состава по станции.....	83
2.5. Информационная модель станции	86
2.6. Модель системы «горка–сортировочный парк».....	90
2.6.1. Модель сортировочного парка.....	91
2.6.2. Модель планирования расформирования составов	95
2.6.3. Моделирование технологических операций в сортировочном парке	96
2.7. Генератор входящего потока поездов	99
2.8. Моделирование работы станции с использованием эргатической модели	103
2.9. Регенеративный метод функционального моделирования железнодорожных станций.....	108
2.10. Моделирование работы железнодорожных станций на основе построения суточного плана-графика.....	113
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ.....	
3.1. Проблемы разработки функциональных моделей станций.....	118
3.2. Построение модели технологического процесса на основе объектно-ориентированной платформы.....	119
3.2.1. Основные элементы объектно-ориентированной модели технологического процесса.....	119
3.2.2. Язык обработки сообщений ФМС.....	122
3.2.3. Структура файла данных технологии	123
3.3. Автоматизация построения модели технологического процесса.....	137
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ И ОЦЕНКА ЕЕ АДЕКВАТНОСТИ	
4.1. Основные принципы идентификации моделей железнодорожных станций.....	151
4.2. Анализ технического оснащения станции и его формализация	155
4.3. Определение параметров входящего потока заявок	159
4.3.1. Анализ интенсивности входящего потока заявок.....	159
4.3.2. Определение параметров прибывающих составов.....	161
4.4. Определение параметров системы обслуживания	166
4.5. Оценка адекватности модели	169
МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ СТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	
5.1. Проблемы технико-экономического управления на железнодорожном транспорте.....	174

5.2.	Методика векторной оптимизации параметров станции.....	176
5.2.1.	Постановка задачи.....	176
5.2.2.	Методика решения задачи векторной оптимизации.....	179
5.3.	Совершенствование технико-технологических параметров станции.....	183
5.3.1.	Постановка задачи исследования.....	183
5.3.2.	Выполнение экспериментов с моделью станции.....	187
5.3.3.	Определение рациональных технико-технологических параметров железнодорожной станции.....	190

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ..... 197

6.1.	Проблемы повышения качества профессиональной подготовки оперативно-диспетчерского персонала железных дорог.....	197
6.2.	Пути повышения профессионального уровня ОДП.....	198
6.3.	Принципы построения имитационного тренажера дежурного по станции.....	202
6.3.1.	Требования, предъявляемые к компьютерным тренажерам ОДП.....	202
6.3.2.	Структура имитационного тренажера.....	203
6.3.3.	Функциональная характеристика тренажера.....	207
6.4.	Оценка эффективности управления станцией с использованием методов кластерного и дискриминантного анализа.....	212
6.4.1.	Методика оценки уровня профессиональной подготовки ОДП с использованием имитационных тренажеров.....	212
6.4.2.	Выбор показателей для оценки уровня подготовки ОДП.....	214
6.4.3.	Стандартизация значений информативных показателей.....	215
6.4.4.	Получение обучающей выборки методами кластерного анализа.....	217
6.4.5.	Оценка результатов тренировки с помощью методов дискриминантного анализа.....	221

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... 224

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ ПАРКА ПРИЕМА..... 239

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ПОЕЗДОВ..... 249

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОЕЗДОВ В ПАРКЕ ПРИЕМА СТАНЦИИ..... 258

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ЭФФЕКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ РАБОТЫ ПАРКА ПРИЕМА..... 261

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АОС	– автоматизированные обучающие системы
АСОУП	– автоматизированная система оперативного управления перевозками
АСУ	– автоматизированная система управления
ГВП	– генератор входящего потока заявок
ГИД	– график исполненного движения
ГМПР	– геометрическая модель путевого развития
ДИИТ	– Днепропетровский институт инженеров транспорта (сейчас – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)
ДНЦ	– поездной диспетчер
ДСП	– дежурный по станции
ДСПГ	– дежурный по сортировочной горке
ДСЦ	– маневровый диспетчер
ИМ	– информационная модель
ИМРМ	– информационная модель рабочего места
ИС	– изолированная секция
КА	– конечный автомат
ЛВМ	– лицо, выполняющее моделирование
ЛСА	– логическая схема алгоритма
МЗП	– модель занятия путевых участков
МПР	– модель путевого развития
МПЦ	– микропроцессорная централизация
МРЦ	– маршрутно-релейная централизация
МСУП	– модель системы управления перемещениями подвижного состава
МТП	– модель технологического процесса
МУ	– модуль управления

НИИЖТ	– Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта (сейчас – Сибирский государственный университет путей сообщения)
ОДП	– оперативно-диспетчерский персонал
ОТМ	– организационно-технические мероприятия
ПГУПС	– Петербургский государственный университет путей сообщения
ПП	– парк приема
ПТО	– пункт технического обслуживания вагонов
РИИЖТ	– Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта (сейчас – Ростовский государственный университет путей сообщения)
СВ	– случайная величина
СМО	– система массового обслуживания
СП	– стрелочный перевод
СППР	– система поддержки принятия решений
СТЦ	– станционный технологический центр
ТГНЛ	– телеграмма-натурный лист
ТП	– технологический процесс
ТРА	– технико-распорядительный акт железнодорожной станции
УрГУПС	– Уральский государственный университет путей сообщения
УкрГУЖТ	– Украинский государственный университет железнодорожного транспорта
ФМС	– функциональная модель станции
ЧД	– человек-диспетчер
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭЦ	– электрическая централизация

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожные станции являются одним из важнейших элементов транспортной инфраструктуры государства. От качества их работы существенно зависит уровень конкурентоспособности железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы усовершенствования железнодорожных станций и приведения их в соответствие с современными требованиями рыночной экономики. При этом возникает проблема выбора рационального комплекса мероприятий, направленных на усовершенствование конструкции, технических и технологических параметров железнодорожных станций с учетом их места и роли в системе организации вагонопотоков на сети железных дорог Украины. С учетом масштабности и важности планируемых с этой целью организационно-технических мероприятий повышаются требования к качеству проектных решений и достоверности их количественной оценки. Не менее важная составляющая комплексной проблемы усовершенствования станций – повышение эффективности эргатической системы управления, основным звеном которой является оперативно-диспетчерский персонал (ОДП) станций.

Выбор рационального комплекса реконструктивных и/или организационных мероприятий для каждой конкретной станции – весьма сложная задача, т.к. выполнение натуральных экспериментов на реальных объектах для оценки намеченных вариантов в большинстве случаев не представляется возможным. Эффективным средством анализа и оценки показателей функционирования станций в различных условиях, прогнозирования их технико-технологических и экономических параметров являются математические и имитационные модели, которые в сочетании с современными средствами вычислительной техники становятся мощным инструментом для исследования станций

и оптимизации их работы. С помощью модели можно спрогнозировать показатели работы станции после внедрения предусмотренного комплекса мероприятий. Однако значительная сложность технологических процессов функционирования железнодорожных станций делает невозможным использование для этих целей формализованных аналитических зависимостей. Существующие же аналитические методы определения показателей работы станций не учитывают в достаточной степени взаимодействие и взаимное влияние отдельных элементов станции, недетерминированный характер работы железных дорог, деятельность диспетчерского персонала и могут использоваться лишь для приближенных расчетов. В этой связи для исследования работы железнодорожных станций целесообразно использовать методы функционального моделирования.

С помощью функциональной модели с применением различных математических методов, в первую очередь, моделируются конечные результаты функционирования исследуемого объекта в целом, а также отдельных его элементов. При этом сложные взаимосвязи между элементами объекта, а также влияние воздействующих на него внешних факторов описываются простыми функциональными зависимостями и алгоритмами, на основании которых получают показатели, характеризующие результат выполнения определенных функций того или иного элемента исследуемого объекта.

Одним из направлений реализации парадигмы функциональных моделей сложных систем является имитационное моделирование на ЭВМ. Однако, как показывает анализ, существующие модели железнодорожных станций, как правило, ориентированы на решение узкоспециализированных задач и во многих случаях – только для конкретной станции. Кроме того, в этих моделях недостаточно внимания уделяется вопросам управления технологическими процессами станций. Вместе с тем эффективность функционирования станции в значительной степени зависит от качества оперативного управления, которое осуществляет диспетчерский аппарат. В то же время в существующих моделях станций управленческая деятельность диспетчерского персонала практически не учитывается, что не обеспечивает достаточный уровень их адекватности. В этой связи авторами предлагается концепция эргатического функционального моделирования работы железнодорожных станций, при котором человек-оператор

принимает непосредственное участие в моделировании, управляя технологическим процессом и выполняя функции диспетчера.

В разработанной функциональной эргатической модели железнодорожная станция рассматривается как сложная система массового обслуживания, состоящая из множества элементов, которые в процессе работы тесно взаимодействуют друг с другом, оказывая взаимное влияние. Поэтому для построения функциональной модели железнодорожной станции с использованием объектно-ориентированного подхода разработаны универсальные модели ее элементов, что позволяет унифицировать процесс создания таких моделей, учитывая при этом особенности технического оснащения и технологии работы конкретной станции.

Разработанные функциональные модели могут быть использованы для получения технико-экономической оценки различных мероприятий, направленных на совершенствование конструкции, технического оснащения и технологии работы станций. При этом предварительно выполняется идентификация модели, в результате которой формализуется техническое оснащение и технологический процесс работы исследуемой станции, разрабатывается ее информационная модель, определяются параметры входящего потока поездов, устанавливаются законы распределения случайных величин времени выполнения технологических операций. По результатам серии экспериментов с моделью определяют показатели работы в заданных эксплуатационных условиях, которые используются для технико-экономического сравнения вариантов совершенствования конструкции и технологии работы станции. Выбор рационального варианта может быть осуществлен на основе методов векторной оптимизации. Моделирование работы станции может также выполняться на основе автоматизированного построения суточного плана-графика, который обеспечивает большую информативность и удобство анализа полученных результатов.

Другим важным направлением использования функциональных эргатических моделей железнодорожных станций является разработка на их основе имитационных компьютерных тренажеров для подготовки ОДП станций как одного из наиболее эффективных современных средств подготовки и тестирования персонала. В монографии рассматривается методика построения и использования подобных тренажеров.

Проблемы функционального моделирования железнодорожных станций

1.1. Анализ методов моделирования железнодорожных станций

Стратегией развития транспортного комплекса Украины до 2020 г. [1] предусмотрен ряд мероприятий, направленных на приведение технического оснащения железных дорог в соответствие с новыми условиями работы: реструктуризация парка подвижного состава, введение скоростного движения, организация транспортных коридоров, концентрация сортировочной работы и т. д. Железнодорожные станции являются одним из главных элементов транспортной инфраструктуры страны, поэтому особую актуальность в настоящее время приобретают вопросы совершенствования работы станций при безусловном обеспечении безопасности движения. При этом, с одной стороны, станции должны обладать достаточным резервом пропускной и перерабатывающей способности для эффективной работы в условиях неравномерности транспортных потоков, с другой – неоправданное увеличение технического потенциала станций приводит к росту их эксплуатационных расходов. Для решения указанной сложной и противоречивой задачи необходима достоверная количественная оценка планируемых мероприятий по совершенствованию конструкции и технологии работы станций. Эффективным средством анализа и оценки показателей функционирования станций, их технико-технологических и экономических параметров является имитационное моделирование станционных процессов с использованием современных средств вычислительной техники. Использование имитационных моделей при выполнении проектных работ, а также при оперативном управлении на станциях позволит принимать наиболее

рациональные решения, направленные на сокращение собственных расходов станций и увеличение прибыли от перевозок.

Следует отметить, что вопросам имитационного моделирования железнодорожных станций в отечественной и зарубежной науке посвящено достаточно большое число работ.

Исследования по проблемам создания имитационных моделей железнодорожных станций для изучения и оптимизации их работы были начаты в 60-х годах прошлого века с появлением серийных ЭВМ [2, 3]. В указанных работах для анализа загрузки технических устройств станций предлагалось использовать статистическое моделирование технологических процессов. При этом для учета неравномерности работы станций моделируется случайный входящий поток поездов, а продолжительность обслуживания поезда на станции моделируется как случайная величина с заданным законом распределения. По результатам моделирования определяются «узкие» места на станции, задержки и простои поездов.

Дальнейшее развитие теория моделирования железнодорожных станций получила в фундаментальной работе [4], в которой сформулированы наиболее общие принципы формализации станций и узлов, излагается методология построения их функциональных моделей. В этой работе рекомендуется применять системный подход к построению модели железнодорожной станции или узла. При этом станция или узел рассматривается как многофазная система массового обслуживания, в которую поступают заявки на обслуживание (поезда, составы, локомотивы и др.). Станция структурно представляется в виде набора различных технологически связанных блоков, каждому из которых соответствует определенная фаза обслуживания заявки. С использованием разработанных моделей методом статистических испытаний предполагается получение количественной оценки работы станции в тех или иных условиях. Результаты исследований могут быть использованы для проверки надежности технических средств и системы обслуживания, определения пропускной способности станций и узлов, а также при выборе вариантов проектных решений.

В 70-е годы появление более мощных ЭВМ дало своеобразный толчок к интенсификации работ в области моделирования станций и узлов. В этот период разработано множество методов и алгоритмов моделирования, многие из которых были реализованы на ЭВМ в виде программ.

В этом отношении следует особо отметить работы [5, 6], в которых сформулированы основные проблемы и подходы к моделированию станций, приведены описания моделирующих алгоритмов и результаты исследований. Практической реализацией идей, изложенных в указанных работах, стал сборник программ для расчета станций методом моделирования [7]. В [5, 6] также рассмотрена проблема выбора очередности передвижений при возникновении конфликтных ситуаций. Для ее решения предложено установить систему правил по выбору очередности. С этой целью в [5] сформулировано пять правил выбора, полученных на основе анализа передвижений в горловинах нескольких крупных станций. Эти правила используются в модели станции при необходимости одновременной установки пары враждебных маршрутов. В [6] рассматриваются способы выбора вариантных маршрутов. При этом рекомендуется при разработке модели станции список вариантных маршрутов дополнять данными о порядке их предпочтения.

В работах [8–11] приведено описание и результаты применения имитационной модели сортировочной станции, разработанной в НИИЖТе. Модель предусматривает имитацию выполнения всех технологических операций с поездами и вагонами во всех парках станции, в том числе и процесс накопления составов в сортировочном парке. Объекты (поезда), поступающие на станцию, обслуживаются в соответствии с их приоритетами [10]. Обслуживание объекта в каждом парке станции моделируется как одна сквозная операция, что существенно сокращает время моделирования, но не соответствует реальному технологическому процессу работы. Кроме того, такой подход может вызвать необоснованные задержки в обслуживании объектов с более низким приоритетом. Очередность передвижения объектов по станции также устанавливается в зависимости от их приоритета. При этом не учитывается возможность перемещения объектов с более низким приоритетом по параллельным маршрутам.

С помощью разработанной статистической модели в [12] решается задача определения «узких» мест в работе сортировочной станции. В процессе моделирования на станцию поступает случайный поток поездов. При этом для каждого поезда устанавливается набор параметров, определяющих технологию и продолжительность его обслуживания. Как и в [4], станция представляется набором взаимосвязанных блоков, моделирующих определенную стадию (фазу)

обслуживания объекта. Моделирование продолжительности нахождения объекта в каждой фазе выполняется без учета отдельных технологических операций, что является недостатком предложенного метода, так как не обеспечивает адекватности модели. Кроме того, в [12] весьма упрощенно моделируется занятие горловин станции подвижным составом при его перемещении и не учитывается враждебность маршрутов.

Одной из проблем, возникающих при разработке моделей станций, является сложность представления схем путевого развития для моделирования перемещений подвижного состава. Для ее решения в [7] горловины станций предлагается делить на отдельные элементы (секции), что позволяет определять враждебность маршрутов и достаточно точно моделировать процесс их посекционного размыкания. Недостатком метода является его громоздкость вследствие необходимости задания продолжительности занятия каждого элемента передвижениями разных категорий. В [13] предложен способ формализации схемы станции, который не требует разбивки горловин на элементы. Для моделирования передвижений составляется таблица возможных маршрутов, которая дополняется таблицей враждебности маршрутов. Однако процесс составления таких таблиц достаточно трудоемкий, особенно для крупных станций. Кроме того, при этом не учитывается возможность посекционного размыкания маршрутов.

Во многих работах для моделирования работы объектов транспортной инфраструктуры предлагается использовать аппарат теории массового обслуживания [14]. Так, в [15] рассматривается возможность применения методов теории массового обслуживания для исследования работы парка приема сортировочной станции. При этом математический аппарат теории массового обслуживания используется для определения показателей работы парка приема в различных условиях. Вопросы применения методов теории массового обслуживания при моделировании грузовых станций изучаются в работе [16]. Здесь в качестве системы массового обслуживания рассматривается как станция, так и ее отдельные грузовые районы. Проанализированы также методы и алгоритмы моделирования грузовых операций с вагонами. Недостатком предложенных в указанных работах методов моделирования является то, что поток заявок (поездов, вагонов), поступающих для обслуживания, рассматривается как простейший,

а интенсивность обслуживания принята постоянной, что не соответствует реальным условиям работы железнодорожных станций.

Модель сортировочной станции для нормирования показателей ее работы разработана в РИИЖТе [17]. Станция рассматривается как многоканальная многофазная система массового обслуживания. При моделировании учитываются вероятностные характеристики потока поездов и интенсивности их обслуживания. Предусмотрена также возможность поступления некоторых категорий поездов по графику. Для каждого поезда, следующего в расформирование, моделируется его состав. Продолжительность операций определяется с учетом параметров поезда и системы обслуживания. Предложена также методика для моделирования процесса накопления вагонов в сортировочном парке. По результатам моделирования рассчитывается поэлементный простой вагонов на станции. Вместе с тем в предложенной модели не учитывается занятие элементов путевого развития при перемещении подвижного состава, что существенно снижает ее адекватность.

Заслуживает внимания также опыт железных дорог Польши [18]. В этой работе станция рассматривается как система массового обслуживания, состоящая из совокупности блоков двух видов: постов обслуживания и пунктов ожидания обслуживания. При моделировании используется событийная модель станции, которая предполагает изменение ситуации дискретно от события к событию. Достоинством такого подхода является существенно меньшая продолжительность моделирования по сравнению с непрерывным моделированием, но при этом не учитывается непрерывный характер технологического процесса работы станций, что бывает необходимо при решении определенного круга задач. Кроме того, в настоящее время при наличии быстродействующих ЭВМ скорость моделирования не является существенным фактором при выборе метода моделирования.

В [18] процесс обслуживания объектов на станции моделируется укрупненно, без подразделения на технологические операции. При этом продолжительность нахождения объекта в каждой из фаз обслуживания принимается постоянной или определяется как значение линейной функции в зависимости от параметров объекта и поста обслуживания. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что такой подход не соответствует реальным процессам, происходящим на станциях, так как продолжительность обслужива-

ния в большинстве случаев представляет собой случайную величину с определенным законом распределения, что необходимо учитывать при моделировании.

Попытки детализировать процесс обслуживания объектов в сложных транспортных системах привели к созданию моделей в виде сетей систем массового обслуживания (СМО), каждая из которых имитирует отдельную фазу обслуживания [19, 20]. Вероятностный метод анализа транспортных систем и их элементов разработан в [21]. Указанный метод позволяет определить пропускную (перерабатывающую) способность элементов станций и узлов с учетом колебаний транспортных потоков и времени обслуживания отдельных транспортных единиц. Данный метод не требует проведения имитационного моделирования транспортных систем и дает возможность получить предварительную оценку мероприятий, направленных на совершенствование конструкции и технологии работы станций. Представляет интерес вероятностный метод оценки простоя вагонов для совершенствования технологии работы станций, приведенный в [22].

Еще одна методика построения модели сортировочной станции предложена в работе [23]. Модель станции представляет собой набор программных модулей, каждый из которых моделирует начало и окончание операций определенной технологической последовательности. При этом учитываются случайные колебания входящего потока объектов и неравномерность их обслуживания. Предложен также метод формализации схем станций, позволяющий учитывать враждебности маршрутов при моделировании перемещений подвижного состава. Вместе с тем процесс разработки программных модулей достаточно трудоемкий, что существенно ограничивает применение указанной методики.

Развитие средств вычислительной техники, и в первую очередь ПЭВМ, переход к новой информационной технологии управления положили начало работам по созданию так называемых имитационных систем. В указанных системах процедуры имитационного моделирования используются в сочетании с оптимизационными методами; при этом в этих системах реализуется диалог «человек–ЭВМ» на всех стадиях имитационного эксперимента.

Разработке подобного рода имитационных систем для моделирования железнодорожных станций посвящены работы [24–26]. Предложенная методика основана на использовании аппарата теории ве-

роятностей для моделирования входящих потоков заявок и продолжительности их обслуживания. Модель применяется для прогнозирования работы станций в различных условиях и при выборе вариантов технических решений. Недостатком предложенной модели является укрупненное рассмотрение технологических процессов обработки поездов и вагонов в парках станции, что не позволяет достаточно точно моделировать работу станции. В работе [26] имитационная модель станции используется для оценки ее эксплуатационной надежности. При этом станция рассматривается как комплекс взаимосвязанных унифицированных модулей. Такой подход позволил создать типовой алгоритм для формализации обслуживающих каналов любого типа. Разработанная в [26] модель дает возможность определить показатели работы основных подсистем станции, загрузку технических средств и исполнителей, а также выполнить поэлементный анализ простоя вагонов на станции.

Методика построения имитационных моделей для определения пропускной способности транспортных систем разработана в [27]. В данной работе всякий транспортный объект (станция) представляется формализованным описанием его постоянных устройств, переменных средств и системы оперативного управления работой. Реальную систему оперативного управления и, в частности, определение очередности обработки заявок в имитационной модели предложено отражать алгоритмами, с помощью которых выбираются решения конфликтных ситуаций. В [27] выделено четыре типа конфликтных ситуаций и предложены правила их решения. Реализация этих правил представляет собой достаточно сложную задачу, которая, тем не менее, не решает проблему выбора очередности во всем многообразии конфликтных ситуаций. Достоинством данной модели является то, что в ней технологический процесс обработки заявок представляется совокупностью элементарных операций, выполняемых параллельно или последовательно. При этом для каждой элементарной операции определены состав постоянных устройств и переменные средства, а также время их занятия, которое рассматривается как случайная величина с заданным законом распределения. Как недостаток разработанной модели следует отметить невозможность указания взаимной обусловленности операций.

С помощью имитационной модели, разработанной на основе теории массового обслуживания, решаются вопросы прогнозирования

и планирования работы железнодорожных станций в исследованиях [28, 29]. Модель может быть использована для планирования работы станции в условиях реконструкции или закрытия технических средств. С помощью модели выполняется оценка различных вариантов организации работы станции в таких условиях [28]. Кроме того, рассматривается возможность применения разработанной модели для нормирования различных показателей работы станции, а также анализа качества работы оперативной смены [29]. С этой целью в начале смены по прогнозным исходным данным о подходе поездов и вагонов выполняется моделирование работы станции. Анализ основывается на сравнении показателей работы станции, полученных по результатам работы смены и вследствие моделирования работы станции.

Развитие средств вычислительной техники создало предпосылки для совершенствования систем имитационного моделирования. Интересен в этом отношении опыт УрГУПС [30, 31], где разработана система моделирования работы сортировочной станции ИСТРА. Имитационная модель используется для оперативного планирования работы станции в изменяющихся условиях и может быть применена при разработке автоматизированного рабочего места маневрового диспетчера. Кроме того, при использовании данной системы на станции имеется возможность получения оперативной информации непосредственно из АСОУП. В общем виде модель станции характеризуется множествами элементов, операций и оператором управления, который описывает логическую последовательность выполнения операций в зависимости от состояния модели. Элементы модели делятся на технологические, информационные и управляющие. Технологические элементы отображают реальные устройства, информационные – имитируют представление реальных устройств в памяти диспетчера, управляющие элементы моделируют процессы управления. Оператор управления реализует ситуационный принцип, на основе которого моделируется процесс принятия решения диспетчером. Операции модели увязываются между собой при помощи «Таблицы взаимосвязи операций». В ней указываются последовательность и условия выполнения технологических, информационных и управляющих операций. При этом в системе ИСТРА реализован принцип пошагового моделирования, управляемого событиями.

Комплексная имитационная модель сортировочной станции разработана на железных дорогах Польши [32]. Она является частью программного комплекса для разработки графика движения поездов и позволяет получить качественные и количественные показатели работы сортировочных станций при различных условиях работы. Модель представляет собой набор взаимосвязанных модулей, каждый из которых моделирует работу отдельных подсистем станции. Входящий поток поездов задается графиком, а продолжительности их обслуживания в подсистемах станции моделируются как случайные величины с определенным законом распределения; имеется также возможность использования постоянных значений времени обслуживания. Вводя различные варианты данных и анализируя полученные результаты, можно выбирать вариант организации работы станции, обеспечивающий выполнение графика движения при наилучшем использовании технических средств. К недостаткам следует отнести сложность подготовки исходных данных для создания модели конкретной станции.

В последнее время для моделирования и оценки железнодорожных транспортных систем широко применяются современные математические методы. Так, в [33] предложен новый объектно-ориентированный подход к построению модели грузовой станции. При этом грузовая станция рассматривается как система массового обслуживания; понятие объекта используется в модели для представления технологических устройств, выполняющих обслуживание клиентов (серверы–объекты) и элементов путевого развития станции (каналы–объекты). При этом сами объекты рассматриваются как некоторые автоматы, обладающие фиксированным набором внутренних состояний и перечнем воздействий, приводящих к переходу автомата из одного состояния в другое. Схема путевого развития станции представлена двумя структурами: списком элементов путевого развития и списком межэлементных связей. Управляет моделью программа-распорядитель, которая выполняет слежение за состоянием каждого объекта и при возникновении внешнего воздействия меняет его состояние. По результатам моделирования осуществляется построение плана-графика работы станции с помощью пакета AutoCAD.

Метод моделирования станций, основанный на использовании математического аппарата марковских случайных процессов, разработан в УкрГУЖТ [34, 35]. В этих работах станция рассматривается как

многофазная одноканальная СМО. Для станции построен оргграф состояний, на базе которого составляется система уравнений Колмогорова для нахождения предельных вероятностей отдельных ее состояний. Указанные вероятности позволяют определить основные технико-технологические параметры станции, необходимые для оптимизации ее мощности. Данный метод достаточно эффективен, однако его сложность резко возрастает при переходе к многоканальным СМО и увеличении числа путей на станции.

Для оценки технического оснащения и эффективности работы сортировочных станций в [36] используется модель, в основу которой положен метод динамики средних. На основе данного метода разработаны модели для определения оптимального количества путей и маневровых локомотивов на станции. При этом процесс функционирования маневрового локомотива моделируется как марковский процесс, состояния которого описываются системой уравнений Колмогорова. Необходимо отметить, что аппарат цепей Маркова достаточно широко используется при моделировании и исследовании транспортных процессов в виду его сравнительной простоты [37, 38]. Однако, как уже отмечалось, потоки заявок, поступающие для обслуживания на объекты железнодорожного транспорта, в большинстве случаев не являются простейшими, а интенсивность обслуживания в реальных условиях не постоянна. Поэтому модели, построенные на основе такого подхода, могут быть использованы только на начальном этапе исследования транспортных объектов для получения предварительных данных о характере их функционирования.

Широкое распространение в последнее время получили модели транспортных объектов, разработанные с использованием аппарата сетей Петри [39–42]. Технологический процесс обработки поездов в таких моделях представляется последовательностью позиций (состояний) и переходов. При этом переходы имитируют обработку объектов в течение заданного времени, а позиции характеризуют текущее состояние системы и определяют условия переходов. При выполнении условий переход срабатывает, в результате чего изменяется текущая разметка сети. В частности, в [41, 42] рассматриваются возможности использования аппарата сетей Петри для моделирования сортировочных станций и других транспортных комплексов. Под руководством проф. Е. В. Нагорного разработана методика представления комплекса «сортировочная станция – примыкающие

участки» в виде сети Петри. В данной работе показано, что путем усложнения структуры сети можно достичь любой степени детализации моделируемой системы. Предусмотрена также возможность моделирования случайных интервалов между поездами входящего потока, а также других параметров. Для реализации модели на ЭВМ могут быть использованы специализированные программные продукты. Приведенный в [41] пример свидетельствует о том, что модель, построенная на основе сетей Петри, позволяет фиксировать состояние системы в произвольный момент времени, а также определить по результатам моделирования интегральные показатели продолжительности выполнения отдельных операций и число обработанных объектов. Имеется возможность исследования модели путем варьирования отдельных количественных параметров.

С использованием указанной методики в [43] разработана модель подсистемы расформирования сортировочной станции, с помощью которой было выполнено исследование функционирования одной из станций Украины. Сети Петри также применяются для моделирования перемещения транспортных объектов (поездов, локомотивов) в моделях железнодорожной сети [44–46]. При этом реальная конфигурация сети железных дорог задается соответствующей сетью Петри. Каждая позиция сети моделирует определенный элемент железнодорожной сети (блок-участок, светофор, отдельный пункт и др.). В [47] на основе сетей Петри разработана имитационная модель железнодорожной станции, которая используется для прогнозирования показателей ее работы в изменяющихся условиях путем автоматизированного построения графика исполненной работы.

Использование сетей Петри позволяет сократить затраты времени на разработку моделей транспортных объектов, а также упростить процесс их создания. Вместе с тем, как недостаток, следует отметить отсутствие в модели алгоритма выбора очередности выполнения отдельных операций при возникновении конфликтных ситуаций. Кроме того, схема путевого развития станции представлена в модели упрощенно в виде перехода «горловина»; замена же его самостоятельной сетью Петри, описывающей конкретную схему горловины, приведет к существенному усложнению структуры модели и тем самым затруднит ее построение и анализ. Наконец, в модели на базе сети Петри достаточно затруднительно имитировать движение транспортных объектов для расчета расходов, связанных с их перемещением.

Метод моделирования работы сортировочной станции, предложенный в [48], основан на применении теории расписаний и используется для определения рационального оперативного плана работы станции. Критерием выбора является минимум всех затрат на выполнение технологических операций при обслуживании поездов и вагонов на станции. Для определения оптимального решения (последовательности выполнения операций) предлагается использовать генетические алгоритмы, которые предусматривают эвристический подход. Однако технологический процесс обслуживания поездов и вагонов на станции в [48] моделируется укрупненно, без учета конструкции путевого развития, а также возможных сбоев и отказов в системе обслуживания.

В [49] предложена имитационная модель сортировочной станции, разработанная на основе теории массового обслуживания, а также сетевого планирования и управления. Ее программная реализация выполнена с использованием современного объектно-ориентированного подхода. Технологический процесс обработки транзитного вагонопотока формализован в модели на основе сетевого графика. При этом переходы между отдельными операциями могут быть детерминированными, вероятностными и условными. Условные переходы реализуются при наступлении определенных событий. Вероятностные переходы разыгрываются в соответствии с заданным вектором вероятностей и позволяют учесть многовариантность организации технологического процесса. При имитационном моделировании сортировочной станции используется транзактно-процессный способ организации квазипараллелизма. С помощью модели оцениваются различные варианты технологии работы станции по обслуживанию транзитного вагонопотока. Отличительной чертой модели является возможность интерактивного участия оператора, который на основе предоставляемой информации (графики показателей, диаграммы использования ресурсов) может вмешиваться в процесс моделирования, выбирая тот или иной вариант технологической последовательности выполнения операций. Вместе с тем модель учитывает только состояние путей станции, конструкция же горловин, а также передвижение по ним в модели не берутся во внимание.

В последние годы для исследования работы железнодорожных станций все чаще используются современные программные системы моделирования. Так, в [50] разработана модель железнодорожной

станции на основе системы AnyLogic, в которой реализованы все три современные парадигмы построения имитационных моделей: системно-динамическая, дискретно-событийная и агентная. Наличие современного графического интерфейса позволяет конструировать модели из многочисленных готовых объектов, содержащихся в готовых проблемно-ориентированных библиотеках. Например, для создания имитационных моделей работы объектов железнодорожного транспорта существует «Железнодорожная библиотека». Особенностью описания железнодорожных объектов с использованием этой библиотеки является представление операций перевозочного процесса при помощи определенных объектов библиотеки. При этом поезда, локомотивы и вагоны представляются в виде «заявок», обрабатываемых этими объектами. Схема путевого развития станции задается группой векторных фигур – ломаных линий и окружностей, изображающих соответственно железнодорожные пути и стрелочные переводы. Маршрут движения задается перечнем элементов путевого развития; при движении контролируется занятость элементов маршрута, а стрелки переводятся автоматически. Вместе с тем в данной модели основной акцент сделан на адекватное моделирование перемещений подвижного состава по станции, а технологический процесс обслуживания поездов и вагонов моделируется упрощенно, без учета возможных вариантов технологии и наличия отказов обслуживающих устройств.

Выполняя анализ опыта создания функциональных моделей железнодорожных станций, нельзя не отметить разработки ученых ДИИТа. В первую очередь, это работы, посвященные моделированию процессов, происходящих на сортировочных горках при расформировании составов. В 1961 году в ДИИТе под руководством проф. Н. Р. Ющенко была создана Горочноиспытательная отраслевая научно-исследовательская лаборатория, одним из направлений деятельности которой стала разработка адекватных моделей и алгоритмов для исследования сортировочного процесса на горках. За годы работы лаборатории под руководством таких ученых, как проф. Е. М. Шафит, проф. Ю. А. Муха, проф. И. В. Жуковицкий, проф. В. И. Бобровский, проф. Д. Н. Козаченко, был создан и успешно апробирован целый комплекс мощных имитационных моделей сортировочных горок, позволяющих моделировать скатывание отцепов, работу вагонных замедлителей, систему управления роспуском, процесс накопления

составов на сортировочных путях [51–55]. Результаты исследований, выполненных с помощью этих моделей, были использованы при разработке автоматизированных систем управления процессом роспуска составов на сортировочных горках. Кроме того, учеными ДИИТа также создан ряд оригинальных имитационных моделей железнодорожных станций [13, 56–58], в основе которых лежит использование методов теории вероятностей и математической статистики.

1.2. Проблемы моделирования диспетчерского управления работой железнодорожных станций

Как известно, эффективность функционирования железнодорожной станции определяется не только уровнем ее технического оснащения и принятой технологией работы; в значительной степени она зависит от системы оперативного управления, которое осуществляют работники ОДП – дежурные по станции (ДСП), дежурные по сортировочной горке (ДСПГ), маневровые диспетчеры (ДСЦ). Поэтому при моделировании работы железнодорожной станций необходимо учитывать управленческую деятельность ОДП, чтобы обеспечить адекватность разработанной модели. Соответственно, моделирование подобных систем должно включать не только процессы пропуска и обслуживания транспортных единиц, но и функции управления этими процессами диспетчерским аппаратом. Если же в модели не предусмотрено оперативное управление технологическим процессом станции со стороны ОДП, то это может привести к получению неточных результатов и, в конечном счете, к принятию неоптимальных или даже ошибочных решений.

Однако, как показал выполненный анализ существующих моделей, построить математическую модель сложной транспортной системы, учитывающую все связи и взаимодействия отдельных ее элементов, весьма затруднительно. При этом особенно сложным представляется моделирование именно управленческой деятельности ОДП, который в зависимости от сложившейся ситуации может изменять порядок прохождения и обработки транспортных объектов, специализацию отдельных путей и парков, за счет перераспределения технических средств и обслуживающего персонала усиливать мощ-

ность отдельных устройств и применять другие мероприятия для пропуска транспортного потока. Следует отметить, что в большинстве существующих моделей станций деятельность ОДП либо вообще не учитывается, либо моделируется достаточно упрощенно.

Так, в [5, 6] для разрешения конфликтных ситуаций, возникающих при выборе очередности передвижений, предлагается набор правил, определяющих приоритетность приготовления маршрутов движения. В [8–10, 18] при выборе очередности обслуживания объектов используется система приоритетов, которая определяется перед началом моделирования. В системе ИСТРА [30, 31] для моделирования деятельности ОДП в состав модели введен специальный оператор (модуль) управления, который описывает логическую последовательность выполнения операций в зависимости от состояния системы. Оператор управления в системе ИСТРА реализует ситуационный принцип управления. При этом каждая конфликтная ситуация, по которой необходимо принять решение, представляется совокупностью состояний всех технологических и информационных элементов системы. После идентификации ситуации принимается соответствующее решение. Список возможных конфликтных ситуаций и соответствующих им решений задается в качестве исходных данных модели при ее разработке и настройке. Вместе с тем, учитывая сложность и многообразие ситуаций, возникающих на станциях, составление такого списка может представлять собой весьма трудоемкую задачу.

Следует отметить, что проблеме разработки методики для адекватного моделирования деятельности человека-диспетчера (ЧД) посвящено достаточно большое число исследований. В этом отношении заслуживают особого внимания работы [59–61], в которых приведена методика моделирования деятельности ЧД для изучения загрузки поездных диспетчеров и дежурных по станции. В указанных работах выполнен детальный анализ деятельности ДНЦ и ДСП, на основе которого выделены основные составляющие элементы их работы. Моделирование деятельности диспетчерского персонала предлагается выполнять с помощью логических схем алгоритмов (ЛСА). Такая схема представляет собой ориентированный граф, вершинам которого соответствуют определенные действия ЧД, а дугам – логические условия. При этом для каждого условия указываются вероятности выбора той или иной его ветви, которые определяются на основе наблюдений за деятельностью диспетчера. Продолжительность

выполнения каждой операции ЧД моделируется как случайная величина с заданным законом распределения [61]. Примеры таких алгоритмов, моделирующих деятельность ДСП и ДНЦ, приведены в [59, 60, 62]. Построенные в этих работах ЛСА позволяют моделировать деятельность диспетчера при решении определенной локальной задачи. Вместе с тем анализ деятельности ОДП показывает, что диспетчер в процессе своей работы обычно решает несколько различных задач одновременно, зачастую требующих взаимно исключающих решений. Построение же ЛСА, учитывающих все многообразие ситуаций в деятельности диспетчера, представляется весьма затруднительным.

В [63] ЛСА предложено использовать для моделирования эталонной деятельности ОДП в ситуационном тренажере дежурного по станции. При этом оценка уровня подготовки работника выполняется на основе сравнения показателей, полученных в результате проведенной им тренировки, с показателями эталонной модели деятельности.

Для построения модели деятельности ЧД в [64] разработана методика, в основу которой положены понятия теории информации. Деятельность диспетчера рассматривается как информационный процесс и моделируется как последовательность переходов от одного информативного состояния к другому по мере поступления информации об объекте управления. Предложенную методику рекомендуется использовать для определения загрузки ЧД.

Заслуживает внимания также работа [65], в которой приведена методика построения имитационной модели деятельности ДСП промежуточной станции. Модель деятельности ДСП рассматривается как элемент системы управления, на вход которого поступают информационные сообщения об изменении объекта управления (станции), а также требования на выполнение различных действий (приготовление маршрута, открытие сигнала и др.). Решение о выполнении того или иного действия принимается на основании имеющейся информации об объекте управления в соответствии с намеченным планом, который задается в начале моделирования. Для реализации модели разработаны соответствующие алгоритмы и таблицы решений. Недостатком приведенной методики является то, что при расширении набора моделируемых действий ДСП таблицы решений существенно

увеличиваются, а их составление представляет собой достаточно трудоемкую задачу.

В модели сортировочной станции, предложенной в [49], для определения наиболее эффективной последовательности выполнения технологических операций с поездами и вагонами используются различные оптимизационные алгоритмы; при этом вариант технологии выбирается на основе определенного критерия (минимальное время нахождения вагонов на станции, максимальный объем переработанного вагонопотока и др.). Кроме того, в модели предусмотрена возможность вмешательства человека-диспетчера для принятия решений по оптимальному распределению ресурсов станции и выбору рациональной технологии обслуживания. С этой целью модель по запросу ЧД выводит информацию о текущих показателях работы станции и загрузке исполнителей в виде диаграмм и графиков.

Вместе с тем во всех указанных работах отмечается значительная сложность построения математической модели управленческой деятельности ОДП, а предложенные алгоритмы являются весьма упрощенными и не позволяют адекватно моделировать процесс принятия решений по оперативному управлению работой станций. В этой связи многие специалисты в области моделирования станций отмечают преимущества графического метода моделирования [4, 66, 67]. Обращаем внимание, что указанные преимущества связаны с тем, что моделирование выполняется специалистами, хорошо знающими структуру транспортной системы, технологию и особенности управления и выполняющими по сути функции диспетчера моделируемой системы. Однако графический метод имеет и существенный недостаток, который заключается в его трудоемкости и, вследствие этого, ограниченном периоде моделирования (обычно сутки); кроме того, низкая скорость построения графика ограничивает количество рассматриваемых вариантов организации станции. Также следует отметить, что при построении графической модели сложно учесть стохастический характер станционных процессов, из-за чего полученное решение имеет частный характер. В то же время использование метода имитационного моделирования работы станций на ЭВМ позволяет значительно ускорить процесс получения результатов.

1.3. Концепция эргатического моделирования железнодорожных станций

Существенные преимущества графического метода, обусловленные непосредственным участием человека в процессе моделирования, а также отсутствие методов адекватного моделирования управленческой деятельности диспетчера в существующих моделях делают целесообразным создание и исследование принципиально новых эргатических систем моделирования, объединяющих высокое быстродействие и точность ЭВМ со способностью человека оперативно принимать решения в сложных и неопределенных ситуациях. Концепция эргатических моделей станций, в которых человек принимает непосредственное участие в процессе моделирования и управляет технологическим процессом станции, выполняя функции диспетчера, предложена в [68]; в данной работе представлены теоретические основы и методология построения таких моделей, показаны перспективы их применения.

Свое дальнейшее развитие концепция эргатического моделирования железнодорожных станций получила в работах ученых ДИИТа, которыми разработана методика построения подобных моделей, а также создан ряд программно-моделирующих комплексов и компьютерных имитационных тренажеров для подготовки ОДП станций. Так, в [69, 70] описана эргатическая модель сортировочной станции, которая используется в тренажере ДСП. Технологический процесс обслуживания поездов формализован на основе сетевых графиков обработки объектов на станции. При этом определенные операции (закрепление, осмотр, расформирование и др.) могут начаться только после соответствующей команды человека. В процессе моделирования человек готовит маршруты следования поездов и локомотивов, что позволяет максимально приблизить имитационную модель станции к реальным условиям.

В работах [71, 72] изложена методика построения функциональных моделей развязок линий в узлах. При этом развязка рассматривается как управляемая СМО, в которой порядок пропуска поездов не является постоянным и определяется диспетчером. С этой целью в модели предусмотрены специальные средства для интерактивного управления пропуском поездов.

При разработке модели сортировочной горки в [73, 74] она также рассматривалась как эргатическая система, составным элементом которой является горочный оператор, выполняющий функции контроля и управления процессом роспуска составов. Для этого в состав модели сортировочной горки введена информационная модель, которая используется оператором при моделировании для контроля текущей ситуации и передачи управляющих команд по роспуску состава. Разработанная эргатическая модель может использоваться как для создания тренажеров для обучения горочных операторов [74], так и для совершенствования конструкции и технического оснащения самих сортировочных горок.

В работах [75–80] учеными ДИИТа разработана общая структура имитационной эргатической модели железнодорожной станции, а также методика построения ее структурных подсистем. В [77, 78, 80] приведены также результаты практической апробации разработанной эргатической модели подсистемы расформирования одной из крупных сортировочных станций для решения задач, связанных с совершенствованием ее технического оснащения и технологии работы. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность эргатических моделей при решении научно-практических задач железнодорожного транспорта. Принципы предложенной концепции и методика построения эргатических моделей железнодорожных станций систематизированы в работах [81, 82].

К недостаткам эргатических моделей можно отнести сравнительно большую продолжительность выполнения экспериментов, поскольку модель должна функционировать в режиме реального времени для возможности принятия решений человеком-оператором. Кроме того, имеет место определенное влияние субъективного фактора на конечные результаты моделирования, так как показатели работы станции в эргатической модели существенным образом зависят как от профессиональных качеств оператора, так и от его психофизиологических характеристик. Вместе с тем авторами был разработан подход, который позволяет существенно сократить продолжительность эргатического моделирования; при этом для уменьшения влияния субъективного фактора на результаты работы эргатической модели к выполнению экспериментов необходимо привлекать только подготовленных специалистов.

Таким образом, в результате анализа публикаций по имитационному моделированию железнодорожных станций авторами была поставлена задача разработки комплексной методики создания их эргатических функциональных моделей. Такие модели позволяют учитывать управленческую деятельность оперативно-диспетчерского персонала станций, что повышает адекватность как самих моделей, так и полученных с их помощью результатов исследований. В процессе решения поставленной задачи разработана общая структура функциональной эргатической модели железнодорожной станции, а также состав и принципы построения отдельных ее элементов, таких как путевое развитие, система станционной автоматики, технологический процесс работы. Для автоматизированной разработки отдельных модулей функциональной модели станции разработаны специальные инструментальные средства, которые позволят ускорить создание подобных моделей и их тиражирование для любых станций.

В монографии также рассмотрены вопросы практического применения разработанных моделей при решении исследовательских задач и при подготовке дежурных по станции с помощью компьютерных тренажеров.

Методика построения функциональных эргатических моделей железнодорожных станций

2.1. Общие принципы построения и структура функциональной эргатической модели железнодорожной станции

Как уже было отмечено, эффективность функционирования железнодорожных станций в значительной степени зависит от качества оперативного управления, которое осуществляется диспетчерским персоналом. В то же время, как показал анализ, в существующих моделях станций управленческая деятельность диспетчерского аппарата либо не учитывается, либо моделируется с помощью упрощенных алгоритмов. Поэтому адекватность подобных моделей во многих случаях является недостаточно высокой. Кроме того, применяемые в настоящее время методы построения имитационных моделей требуют значительных затрат труда и времени высококвалифицированных программистов и технологов, и поэтому имеющиеся модели, как правило, недоступны широкому кругу практиков и в большинстве случаев используются для решения ограниченного круга задач. Учитывая отсутствие в настоящее время методов адекватного моделирования управленческой деятельности ОДП, предлагается концепция эргатических моделей станций, в которых лицо, выполняющее моделирование, принимает непосредственное участие в процессе моделирования и управляет технологическим процессом станции, выполняя функции диспетчера.

Железнодорожная станция представляет собой сложную систему массового обслуживания, состоящую из множества различных элементов, которые в процессе работы тесно взаимодействуют друг

с другом, оказывая взаимное влияние. К таким элементам можно отнести путевое развитие станции и подходов, систему станционной автоматики, сортировочные и грузовые устройства, подвижной состав (поезда, составы, локомотивы и др.), исполнителей различной специализации (сигналист, бригада ПТО, операторы СТЦ и др.), систему оперативно-диспетчерского руководства и т.д. Функциональная модель станции (ФМС) должна отражать как структуру станции, так и взаимодействие ее элементов. Степень детализации моделирования определяется в каждом отдельном случае в зависимости от поставленной задачи [68, 75, 83].

Учитывая сложную иерархическую структуру железнодорожных станций, при разработке их функциональных моделей следует выделить следующие уровни детализации. На метауровне станция рассматривается как СМО, выполняющая обслуживание входящего потока заявок, в общем случае неоднородного (поездов, составов, вагонов, локомотивов и др.). На макроуровне выполняется моделирование технологического процесса обслуживания потока заявок, их перемещения, а также моделирование функционирования системы управления стрелками и сигналами, регулирующей движение объектов на станции. На микроуровне осуществляется моделирование обслуживания отдельных заявок и их движения по маршрутам [69].

Важным требованием к разрабатываемой модели станции является ее универсальность, что предполагает возможность использования ФМС для решения широкого круга научно-прикладных задач. Указанные задачи направлены на повышение эффективности работы железнодорожных станций, в т. ч. в системах поддержки принятия решений для оценки вариантов организационных и реконструкционных мероприятий, в тренажерных обучающих комплексах для подготовки ОДП станций, в АСУ оперативного планирования работы станций. Одним из решений данной проблемы является модульная организация ФМС на метауровне. При этом ФМС представляется набором универсальных модулей, каждый из которых моделирует один из элементов системы «железнодорожная станция». Набор модулей, включаемых в программу для имитации работы станции, определяется характером решаемых задач. Модульная организация позволяет легко модифицировать итоговую модель в соответствии с характером решаемой задачи, а также упрощает синтез моделей для конкретных станций, позволяя учесть особенности их технического оснащения

и технологии работы. При этом одним из основных требований к отдельным модулям является простота и универсальность представления исходных данных за счет усложнения внутренней организации моделирующих программных комплексов. Такой подход позволяет автоматизировать синтез моделей, что сделает их доступными широкому кругу инженерно-технических работников железных дорог [75, 79, 80].

Железнодорожные станции относятся к управляемым системам; при этом оперативное управление работой станций осуществляют работники диспетчерского аппарата (дежурные по станции, маневровые диспетчеры, дежурные по горке). От качества их работы существенно зависят показатели функционирования станций. В этой связи функциональная модель станции должна предусматривать возможность интерактивного участия человека в процессе моделирования для выполнения функций ОДП. Такой подход позволяет учесть управленческую деятельность диспетчерского аппарата станций (человеческий фактор) и за счет этого повысить достоверность результатов моделирования [75, 77, 79].

Адекватность модели определяется степенью ее соответствия реальному объекту. Вместе с тем во многих существующих моделях процесс обслуживания объектов (поездов, составов и др.) на станции моделируется укрупнено, без учета взаимной обусловленности отдельных технологических операций. Также следует отметить, что процесс перемещения единиц подвижного состава зачастую моделируется как одна операция с определенной продолжительностью. При этом не учитываются технико-эксплуатационные параметры подвижного состава, конструкция путевого развития, показания светофоров и др. Для решения данной проблемы и, соответственно, повышения адекватности разрабатываемой модели технологические процессы обслуживания объектов на станции необходимо моделировать с детализацией до отдельных операций [69, 73, 77, 80]. Моделирование перемещения транспортных единиц следует выполнять с учетом их параметров и особенностей путевого развития, а регулирование движением осуществлять на основе моделирования функций систем станционной автоматики [76, 78, 84].

Следует заметить, что в моделях, которые создаются для оценки технико-эксплуатационных параметров станций, одним из главных требований является минимизация времени, необходимого для

получения результатов. В этой связи в эргатических моделях станций целесообразно использовать переменный масштаб системного времени. При этом реальный масштаб времени используется в случаях, когда в работе станции возникают конфликтные и неопределенные ситуации, требующие принятия решения ЛВМ; в остальных же случаях, когда технологический процесс может быть строго формализован, скорость моделирования увеличивается до максимума [82].

Таким образом, были сформулированы основные принципы построения эргатических функциональных моделей железнодорожных станций:

- системный подход к построению моделей отдельных подсистем и модели станции в целом;
- иерархическая структура модели, ее модульная организация, универсальность отдельных модулей;
- эргатическая система управления технологическим процессом;
- детализация технологических процессов обслуживания объектов до отдельных операций;
- имитационное моделирование передвижений транспортных единиц с учетом их параметров и конструкции путевого развития;
- регулирование движения транспортных единиц на основе моделирования функций систем станционной автоматики;
- использование геометрических моделей станций в качестве информационной базы для функционального моделирования.

С учетом изложенных принципов для построения функциональных моделей станций разработаны следующие универсальные модули:

- модель путевого развития станции (МПР);
- модель системы управления перемещениями подвижного состава (МСУП);
- модель технологического процесса станции (МТП);
- информационная модель (ИМ).

Указанные модели реализованы в виде отдельных модулей, построенных с использованием объектно-ориентированного подхода. Программное обеспечение моделирующего комплекса разработано в среде C++Builder. В состав ФМС также введен генератор входящего потока заявок (ГВП), который моделирует поступление объектов в систему обслуживания станции (момент поступления и параметры объектов). Функции системы оперативного управления работой стан-

ции в процессе моделирования выполняет ЛВМ. Синхронизация моделей осуществляется в дискретные моменты системного времени T_c с помощью специально разработанной системы сообщений. Такая организация позволяет унифицировать процесс интегрирования модулей в ФМС для решения задач разного класса. Кроме того, такой подход упрощает синтез моделей конкретных станций, позволяя учесть особенности их технического оснащения и технологии работы. Структура ФМС и схема взаимодействия указанных моделей приведена на рис. 2.1 [77, 80].

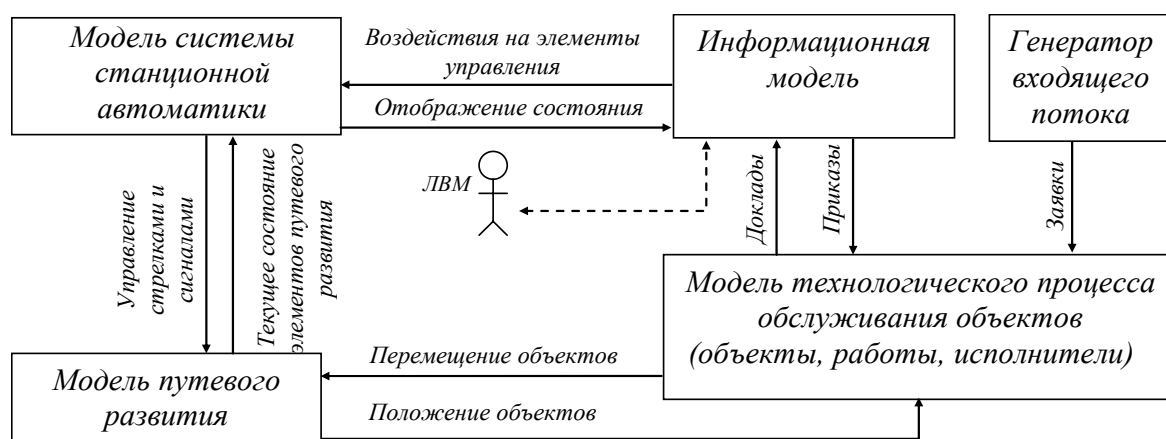


Рис. 2.1. Структура функциональной эргатической модели железнодорожной станции

2.2. Модель путевого развития станции

2.2.1. Назначение модели

Модель путевого развития станции используется для представления геометрических параметров ее плана, отображения текущего состояния стрелочных переводов (СП) и положения подвижного состава на путях станции [76]. Указанная модель должна обеспечивать информацией взаимодействующие с ней модели комплекса, а также реализовывать необходимые управляющие команды. В процессе моделирования МПР должна предоставлять соответствующим модулям (см. рис. 2.1) следующую информацию:

- состояние и положение стрелочных переводов;
- состояние путевых участков;
- положение объектов на путевых участках;
- параметры маршрутов движения объектов.

Кроме того, МПР должна воспринимать такие управляющие команды от других структурных моделей ФМС:

- установить стрелку в заданное положение;
- поместить новый объект на участок пути;
- удалить объект из модели путевого развития;
- переместить объект на заданное расстояние в указанном направлении.

2.2.2. Формализация путевого развития железнодорожных станций

Одной из проблем, которые возникают при разработке функциональных моделей железнодорожных станций, является формализация схем путевого развития станций. Следует отметить, что ее решению посвящено достаточно большое количество работ.

Так, еще в 60-е годы XX столетия под руководством К. К. Таля выполнен ряд исследований по разработке методов кодирования схем станций для их представления в ЭВМ; при этом был предложен оригинальный метод кодирования уравнений, необходимых для расчета путевого развития [85].

Фундаментально проблемы автоматизации расчетов путевого развития станций изучались в Институте кибернетики АН УССР [86]. Автором впервые был разработан метод кодирования схем станций с использованием теории графов. При этом конструкция любой схемы представляется множеством элементарных циклов (контуров), которые выделяются на ее графе.

В работах [87, 88] разработан метод формализованного представления схем станций в виде двухуровневых структур, содержащих информацию о секциях станции и элементах каждой секции. Использован табличный метод кодирования схем, который предусматривает четыре вида таблиц различной структуры, включающих информацию как о топологии схемы, так и о ее параметрах.

В работах проф. А. К. Головнича [89] использован подход к формализации структуры станций, основанный на использовании шабло-

нов типовых схем и отдельных элементов конструкции станций. С помощью программных средств генерируется множество возможных вариантов взаимного расположения неизменяемых шаблонов и внешних устройств станции; при этом учитываются необходимые технологические связи ее элементов.

Оригинальный подход к формализации схем путевого развития на основе ориентированных графов разработан в ДИИТе под руководством проф. В. И. Бобровского [68, 82, 90]. Авторами предложена система структурно-параметрических моделей станций (входная, внутренняя и выходная модели), а также алгоритмы выполнения проектных процедур, которые позволяют автоматизировать процесс синтеза путевого развития станций на всех его этапах. Кроме того, разработан специальный инструментарий (редактор) для выполнения автоматизированного проектирования схем станций на ЭВМ.

Вместе с тем, как показал анализ, практически все разработанные методы и алгоритмы формализации схем путевого развития направлены, в первую очередь, на использование в системах автоматизированного проектирования железнодорожных станций и зачастую не пригодны для функционального моделирования станций. В этой связи авторами была разработана специальная методика построения МПР [76], которая основана на принципах формализации схем станций в виде ориентированных графов [90].

2.2.3. Структура модели

Для реализации всех необходимых функций МПР включает геометрическую модель плана путевого развития (ГМПР) и модель занятия путевых участков (МЗП).

Геометрическая модель построена на основе ориентированного взвешенного графа $G(V, E)$ и отображает состав элементов станции (участки путей, стрелочные переводы, сигналы, концы путей, изолированные стыки), их взаимосвязи, геометрические размеры и текущее состояние [90]. Исходными данными для построения ГМПР станции является ее масштабный план.

В орграфе G выделено три подмножества вершин: V^S , V^C , V^Z . Вершины $v_i \in V^S$ соответствуют центрам стрелочных переводов, вершины $v_j \in V^C$ – светофорам, вершины $v_k \in V^Z$ – изолированным

стыкам. Для разделения множества вершин орграфа G на подмножества, каждому из них выделены непересекающиеся группы номеров: $N^S = \{1, 2, \dots, 199\}$, $N^C = \{201, 202, \dots, 399\}$, $N^Z = \{401, 402, \dots, 999\}$. Дугам орграфа $e \in E$ поставлены в соответствие участки путей между отдельными вершинами.

Орграф G в памяти ЭВМ представляется списком дуг. При этом каждая дуга орграфа обозначается упорядоченной парой вершин $e = (v \rightarrow u)$, где v – начальная, а u – конечная вершина; при этом принято, что все дуги ориентированы слева направо.

Орграф $G(V, E)$ является взвешенным; при этом каждой вершине подмножества $v_i \in V^S$ поставлен в соответствие список параметров

$$\mathbf{X}^S = (s, t, e_1, e_2, e_3, e_4), \quad (2.1)$$

- где s – положение стрелки (0 – по прямому пути, 1 – по боковому пути);
 t – идентификатор стрелочного перевода, определяющий его технические параметры;
 e_1, e_2, e_3, e_4 – дуги графа, инцидентные данной вершине; при этом одна из дуг (e_2 или e_4) соответствует боковому пути стрелочного перевода, а другая имеет нулевое значение; выбор зависит от направления укладки стрелочного перевода: для противоположного $e_2 = 0$, для пошерстного $e_4 = 0$ (рис. 2.2).

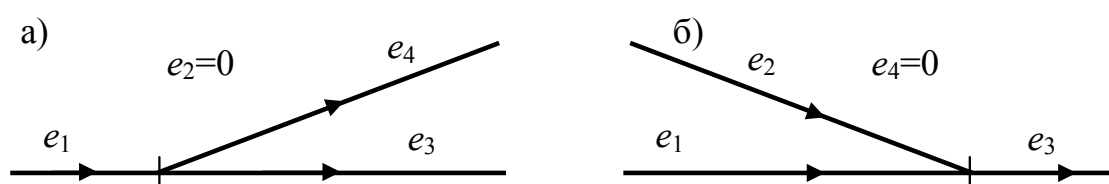


Рис. 2.2. Схема представления стрелочного перевода в ГМПР:
 a – противоположный; b – пошерстный

Такая структура позволяет однозначно определить направление укладки стрелочного перевода, а также контролировать случаи его установки «на взрез» при моделировании движения объектов.

Перекрестные стрелочные переводы представляются двумя одиночными обыкновенными стрелками № 1, 2 (рис. 2.3) с общей дугой e_3 , соответствующей рамному рельсу этих переводов.

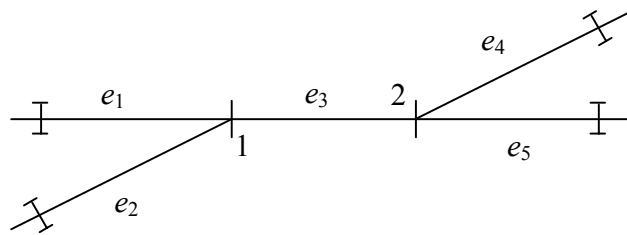


Рис. 2.3. Схема представления перекрестного стрелочного перевода

Для вершин $v_j \in V^C$ должно быть задано направление соответствующего светофора q_c (вправо – $q_c = 0$, влево – $q_c = 1$):

$$\mathbf{X}^C = (r, q_c),$$

где r – идентификатор сигнала.

Каждой вершине $v_k \in V^Z$ (изолированный стык или конец пути) ставится в соответствие только идентификатор. Вершины данного типа задают границы путевых участков и используются при построении маршрута движения на графе G .

Каждой дуге орграфа $e \in E$ поставлен в соответствие список параметров:

$$\mathbf{Y} = (p, v, u, l, N_{\Pi}, F_e, F_o), \quad (2.2)$$

- где p – идентификатор дуги;
 v, u – соответственно начальная и конечная вершины дуги;
 l – длина участка пути, которому соответствует дуга;
 N_{Π} – номер пути в соответствии с принятой на станции нумерацией;
 F_e, F_o – идентификаторы сигналов, которые посылаются в ФМС соответственно при занятии и освобождении путевого участка, соответствующего дуге p , транспортным объектом; каждому такому сигналу соответствует определенная функция, которая выполняется одним из структурных модулей ФМС.

В качестве примера на рис. 2.4 приведен фрагмент схемы станции и соответствующий ей оргграф $G(V, E)$, согласно которому при занятии дуги (путевого участка) № 1 в ФМС посылается сигнал 1 о том, что поезд отправился с соседней станции «А»; при освобождении дуг (участков) № 5, 6 – сигнал 2 о том, что поезд прибыл на станцию «Б». При этом в ФМС выполняются определенные изменения, которые соответствующим образом отображаются в информационной модели.

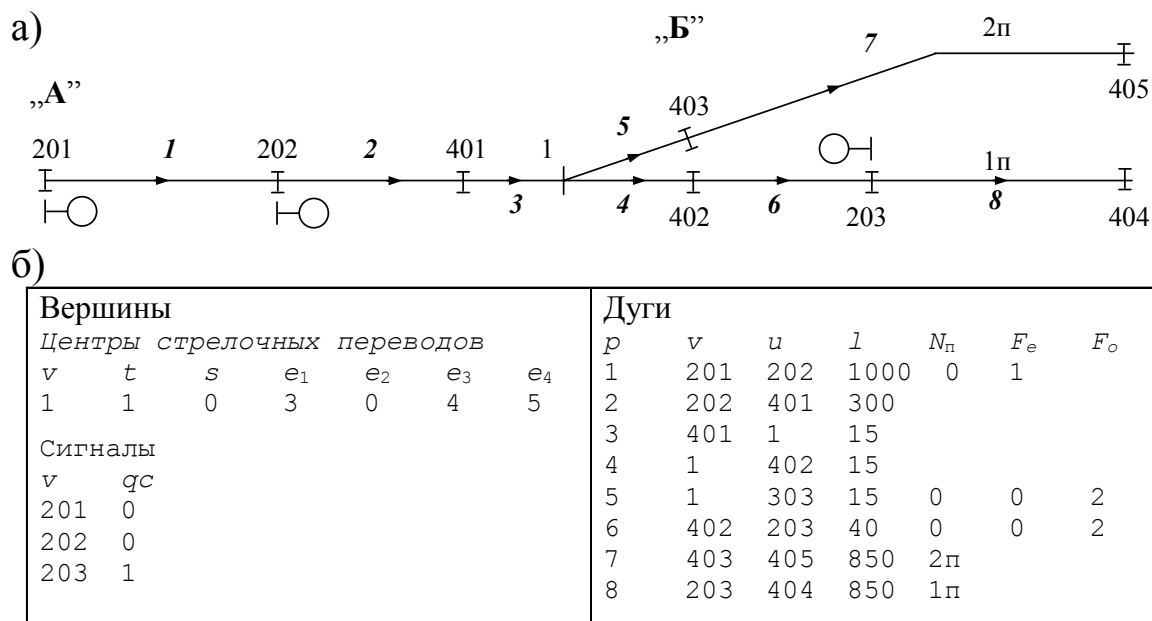


Рис. 2.4. Геометрическая модель путевого развития станции:
 а – схема путевого развития; б – формализованное представление графа $G(V, E)$

Модель занятия путевых участков содержит сведения о текущем положении объектов подвижного состава (поездов, локомотивов, составов) на путях станции. Это позволяет контролировать фактическое состояние каждого путевого участка (занят/свободен), идентифицировать объекты, находящиеся на отдельном путевом участке, и моделировать их движение.

Для реализации МЗП используется динамически обновляемый список, каждый из элементов которого является структурой

$$Q = (N_{\text{пу}}, N_{\text{об}}, l, d),$$

- где $N_{пу}$, $N_{об}$ – соответственно номер занятого путевого участка и идентификатор находящегося на нем объекта;
- l – расстояние от правого конца объекта до конца путевого участка (в соответствии с принятой ориентацией графа);
- d – длина отрезка, занятого объектом $N_{об}$ на путевом участке $N_{пу}$.

Для примера на рис. 2.5 показано размещение двух объектов длиной 25 и 15 м на двух путевых участках 1 и 2, а также приведен список структур Q для представления данной ситуации в МЗП.

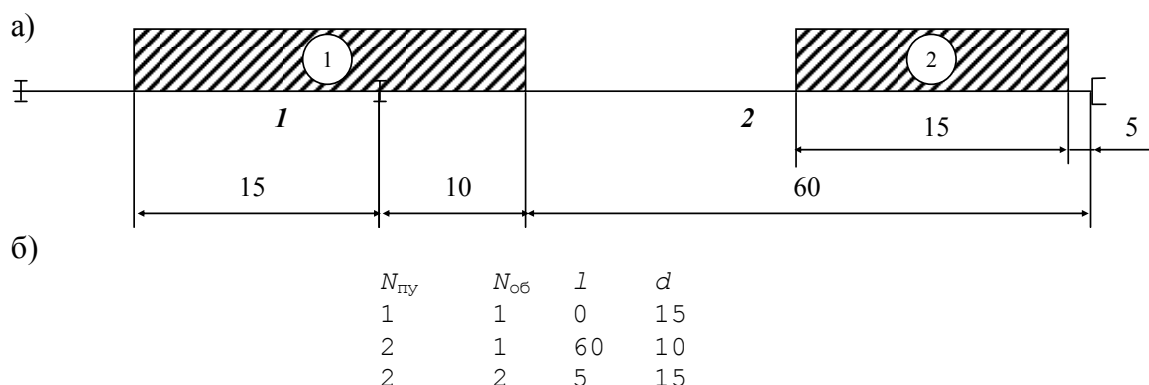


Рис. 2.5. Фрагмент модели занятия путей:

а – схема занятия путевых участков; б – представление МЗП в виде списка структур Q

Для имитации перемещения объектов, а также для их включения и/или исключения из МЗП в дискретные моменты системного времени осуществляется обновление модели. Например, при появлении поезда на подходе к станции он включается в МЗП; после расформирования состава тот исключается из МЗП.

Изложенная методика построения МПР является универсальной и применима к схемам любых железнодорожных станций.

2.3. Модель системы управления перемещениями объектов

2.3.1. Назначение модели

МСУП предназначена для имитации в ФМС технологических функций систем станционной автоматики. Модель контролирует состояние путевых и стрелочных изолированных секций (ИС) станции, имитирует перевод стрелок и переключение светофоров по маршрутам движения [84]. Кроме того, МСУП должна выполнять следующие функции:

- синхронизировать состояния динамических элементов ИМ с состоянием модели путевого развития на каждом шаге моделирования;
- обрабатывать команды от моторных элементов информационной модели (кнопок).

МСУП создается на основе анализа функциональных и топологических связей элементов станции (светофоров, стрелочных переводов, изолированных секций) в системе станционной автоматики.

Анализ ряда существующих моделей железнодорожных станций показывает, что функции систем станционной автоматики в них либо вообще не учитываются, либо моделируются весьма упрощенно. Например, в [7, 30, 50] горловины станций делятся на элементы, каждый из которых представляет собой определенного «исполнителя», участвующего в обслуживании (движении) поезда. В [13, 23] для учета занятости горловин составляется таблица враждебности маршрутов, которая определенным образом контролируется при моделировании перемещений. В [33] используется автоматный подход к моделированию устройств станционной автоматики, при котором функционирование каждого элемента схемы станции (изолированная секция, стрелочный перевод) рассматривается как последовательность переходов между различными состояниями, а в [41, 42] занятость элементов путевого развития моделируется с помощью специальных переходов в сети Петри.

При эргатическом моделировании станций необходимо не только адекватно (в некоторых случаях – в реальном масштабе времени) имитировать функции станционной автоматики при передвижении подвижного состава, но также обеспечивать возможность оператору эргатической модели непосредственно управлять стрелочными пере-

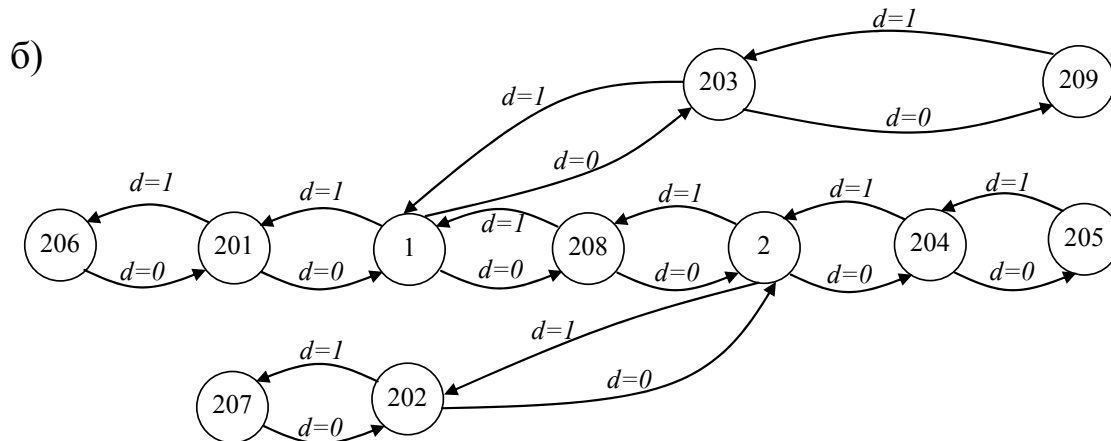
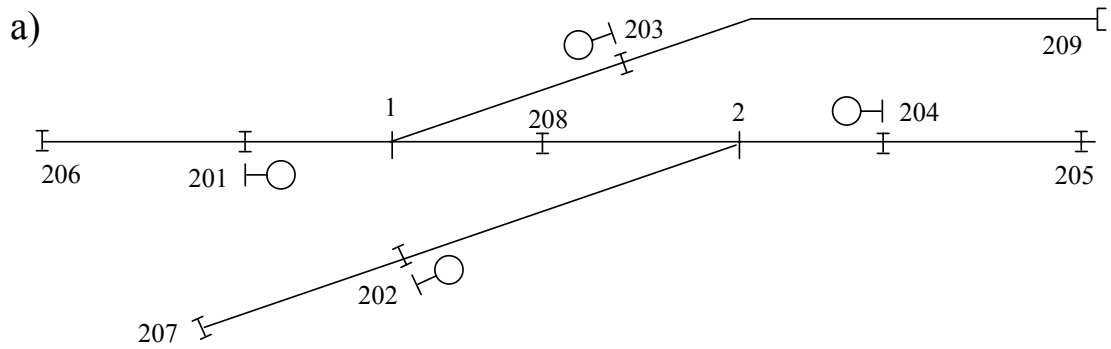
водами и сигналами при приготовлении маршрутов движения. Однако существующие модели станций не позволяют реализовать указанные требования. В этой связи авторами была разработана специальная методика построения МСУП, учитывающая принципы эргатического моделирования [84].

2.3.2. Структура модели

МСУП построена на основе взвешенного ориентированного графа $D(V, E)$, отображающего топологические связи элементов системы станционной автоматики в двух направлениях движения (четном и нечетном). Множество вершин графа D включает два подмножества: стрелочные переводы V^S , светофоры V^C . Изолированные стыки (при отсутствии в данной точке схемы поездного или маневрового светофора) также рассматриваются как вершины подмножества V^C . Вершинам графа V^S поставлены в соответствие одиночные стрелочные переводы. Если схема станции включает более сложные стрелочные переводы (перекрестные, двойные и т. п.), то в модели они заменяются эквивалентной схемой, состоящей из одиночных стрелочных переводов. Для разделения множества вершин графа D каждому из подмножеств выделены непересекающиеся группы номеров: $N^S = \{1, \dots, 199\}$, $N^C = \{200, \dots, 599\}$. Дугам графа $e \in E$ поставлены в соответствие участки путей (2.2) модели путевого развития, которые входят в состав стрелочных или путевых изолированных секций. В качестве примера на рис. 2.6 приведен фрагмент схемы станции, соответствующий ей граф $D(V, E)$ и представляющие его списки инцидентности вершин.

В памяти ЭВМ граф D представляется списками инцидентности его вершин. При этом для возможности деления маршрутов четного и нечетного направлений каждой вершине графа D поставлены в соответствие два списка смежных с ней вершин ($\mathbf{u}_ч, \mathbf{u}_н$), которые связаны с ней соответственно в четном и нечетном направлениях.

Для реализации моделируемых функций граф D дополняется списками технических параметров, характеризующих элементы станции и их функциональные связи в системе станционной автоматики. При этом вершинам графа D поставлены в соответствие такие структуры:



в)

Номер вершины	Смежные вершины			
	u_{q1}	u_{q2}	u_{n1}	u_{n2}
1	208	203	201	—
2	204	—	208	202
201	1	—	206	—
202	2	—	207	—
203	209	—	1	—
204	205	—	2	—
205	0	—	204	—
206	201	—	—	—
207	202	—	—	—
208	2	—	1	—
209	—	—	203	—

Рис. 2.6. Формализация системы управления перемещением:
a – схема путевого развития; *б* – граф $D(V, E)$; *в* – списки инцидентности графа D

а) вершины подмножества V^S (S -тип):

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v}_i^s &= \{N_s, P_s, R_s, \mathbf{Z}_s\}, \\ \mathbf{v}_i^s &\in V^S, i = 1, 2, \dots, n_s, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где N_s – идентификатор стрелочного перевода в МПР;

- P_s – текущее положение СП ($P_s = 0$ – установлен по прямому пути, $P_s = 1$ – на боковой путь);
- R_s – номер стрелочной ИС, в которую входит данный СП;
- Z_s – список, содержащий в качестве элементов данные о требуемом положении смежных пошерстных СП ($z = 0$ – СП, связанный с данным, должен быть установлен по прямому пути, $z = 1$ – на боковой путь, $z = -1$ – положение смежного СП может быть любым). Данный параметр используется для контроля взреза стрелок при установке маршрутов;
- n_s – общее количество СП на станции.

б) вершины подмножества V^C :

$$\left. \begin{aligned} v_j^c &= \{N_c, P_c, T_c, d_c, R_c, R_{\text{ч}}, R_{\text{н}}, Z_c, M_c\}, \\ v_j^c &\in V^C, j = 1, 2, \dots, n_c, \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

- где N_c – идентификатор светофора в МПР;
- P_c – состояние светофора, соответствующего вершине ($P_c = 0$ – закрыт, $P_c = 1$ – открыт как маневровый сигнал, $P_c = 2$ – открыт как поездной сигнал; для вершин, соответствующих изолированным стыкам, $P_c = 0$);
- T_c – тип светофора, определяющий его приоритет ($T_c = 0$ – изолированный стык, $T_c = 1$ – маневровый светофор, $T_c = 2$ – поездной светофор);
- d_c – направление действия светофора ($d_c = 0$ – четное, $d_c = 1$ – нечетное, $d_c = -1$ – для изолированных стыков);
- R_c – номер ИС, при занятии которой в поездном маршруте и освобождении в маневровом показание данного светофора изменяется на запрещающее;
- $R_{\text{ч}}, R_{\text{н}}$ – номера путевых ИС, расположенных между данным светофором и следующей вершиной соответственно в четном и нечетном направлениях;
- Z_c – список, аналогичный списку Z_s (2.3);
- M_c – список номеров ИС, входящих в состав установленного маршрута, началом которого является данный светофор;

n_c – общее число светофоров и изолированных стыков на станции.

Контроль занятости путевых участков системы станционной автоматики выполняют с помощью рельсовых цепей, которые объединяются в путевые и стрелочные изолированные секции. В этой связи оргграф D дополняется списком \mathbf{R} , каждый элемент которого соответствует определенной путевой или стрелочной изолированной секции и представляется в виде структуры

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_k &= \{N_r, T_r, P_r, \mathbf{B}\}, \\ k &= 1, 2, \dots, n_r, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где N_r – идентификатор ИС;

T_r – тип ИС ($T_r = 0$ – соответствует стрелочной ИС, $T_r = 1$ – путевой, $T_r = 2$ – блок-участку);

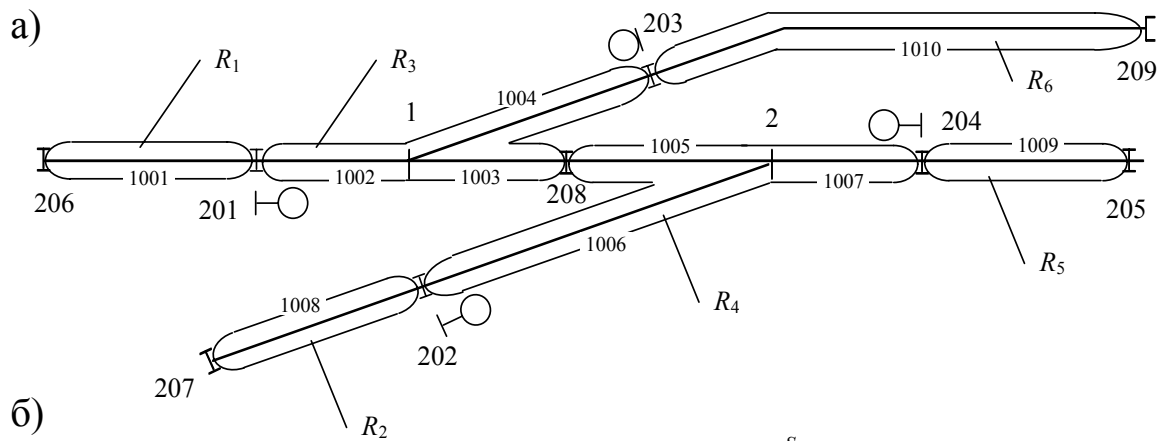
P_r – текущее состояние ИС ($P_r = 0$ – свободна, $P_r = 1$ – замкнута в маршруте, $P_r = 2$ – занята подвижным составом);

\mathbf{B} – список идентификаторов путевых участков МПР, входящих в состав данной изолированной секции;

n_r – общее количество ИС на станции и подходах к ней.

Для примера на рис. 2.7 приведен фрагмент схемы станции с указанием элементов МСУП и файл данных, представляющий данную схему в ЭВМ.

На каждом шаге системного времени T_c МСУП осуществляет контроль текущего состояния всех изолированных секций. При этом для каждой ИС проверяется занятость подвижным составом путевых участков, номера которых содержатся в списке \mathbf{B} (2.5). Изолированная секция считается физически свободной, если все путевые участки, входящие в ее состав, не заняты подвижным составом. При изменении состояния секции (замыкание, занятие или освобождение) в информационную модель передается соответствующая команда, в которой указывается номер секции N_r и ее состояние P_r . Разработанная структура МСУП является универсальной и может быть использована при формализации различных систем станционной автоматики (ЭЦ, МРЦ, БМРЦ).



Стрелочные переводы V^S

N_s	Смежные вершины				Параметры				
					R_s	Z_s			
	$u_{ч1}$	$u_{ч2}$	$u_{н1}$	$u_{н2}$		$z_{ч1}$	$z_{ч2}$	$z_{н1}$	$z_{н2}$
1	208	203	201	0	3	-1	-1	-1	-1
2	204	0	208	202	4	-1	-1	-1	-1

Сигналы и изолированные стыки V^C

N_c	Смежные вершины		Параметры						
			T_c	d_c	R_c	$R_ч$	$R_н$	Z_c	
	$u_{ч1}$	$u_{н1}$						$z_{ч1}$	$z_{н1}$
201	1	206	2	0	3	0	1	-1	-1
202	2	207	2	0	4	0	2	1	-1
203	209	1	1	1	3	6	0	-1	1
204	205	2	2	1	4	5	0	-1	-1
205	0	204	0	-1	0	0	5	-1	-1
206	201	0	0	-1	0	1	0	-1	-1
207	202	0	0	-1	0	2	0	-1	-1
208	2	1	0	-1	0	0	0	0	0
209	0	203	0	-1	0	0	6	-1	-1

Изолированные секции R_k

N_r	T_r	B				
		b_1	b_2	b_3	...	b_n
1	2	1001	-	-	-	-
2	2	1008	-	-	-	-
3	0	1002	1003	1004	-	-
4	0	1005	1006	1007	-	-
5	1	1009	-	-	-	-
6	1	1010	-	-	-	-

Рис. 2.7. Кодирование элементов МСУП в ЭВМ:

a – схема путевого развития; b – файл данных в ЭВМ

2.3.3. Контроль и управление стрелочными переводами

МСУП в зависимости от характера решаемой задачи и особенностей системы станционной автоматики предусматривает два режима перевода стрелок:

1) индивидуальный перевод – предусматривается при моделировании работы станций, оборудованных системой электрической централизации стрелок и сигналов (ЭЦ). В этом случае перевод стрелки при моделировании инициирует ЛВМ путем воздействия на соответствующий моторный элемент информационного поля ФМС;

2) автоматический перевод при установке маршрута – предусматривается при моделировании работы станций, оборудованных системами маршрутно-релейной (МРЦ) или блочной маршрутно-релейной централизации (БМРЦ). Перевод стрелки инициируется в МСУП при задании маршрута движения после проверки возможности его установки.

Исходное положение всех СП задается в начале моделирования в файле данных ГМПП (2.1).

После получения команды на перевод стрелки (от ЛВМ или МТП) ФМС осуществляет обращение к МСУП, которая выполняет проверку возможности ее перевода. При этом проверяется свобода ИС R_s (2.3), в которую входит данный СП. Положение стрелки P_s изменится лишь в том случае, если стрелочная секция \mathbf{R}_k (2.5) с идентификатором $N_r = R_s$ свободна, т. е. $P_r = 0$, $P_r \in \mathbf{R}_k$. При этом из МСУП передается соответствующая команда в МПР, которая имитирует перевод стрелки и передает в МСУП подтверждение о его завершении. После этого стрелочный перевод устанавливается в новое положение P'_s .

Если стрелочная секция замкнута в маршруте ($P_r = 1$) или занята подвижным составом ($P_r = 2$), команда на перевод стрелки в МПР не передается и положение стрелки в МСУП не изменяется. Кроме того, возможны случаи, когда перевод стрелки невозможен вследствие ее неисправности. При имитации таких ситуаций, например, в тренажерах диспетчерского персонала, после передачи команды в МПР на перевод стрелки подтверждение о его успешном завершении в МСУП не передается и положение стрелки не изменяется.

Следует отметить, что в моделях, которые создаются для оценки технико-эксплуатационных параметров станций, одним из главных требований является минимизация времени, необходимого для получения результатов. В этой связи более предпочтительным является маршрутный режим приготовления маршрутов, который обеспечивается при маршрутно-релейной централизации. При этом установка требуемого маршрута движения задается путем указания его начальной и конечной точки (светофора). Применение такого режима в ФМС существенно ускоряет процесс приготовления маршрутов и, соответственно, сокращает продолжительность моделирования. Режим индивидуального перевода стрелок (ручной режим) может быть использован при моделировании работы станций, оборудованных системой ЭЦ, в тренажерах для подготовки ОДП.

2.3.4. Управление светофорами и контроль маршрутов движения

Управление движением объектов (поезда, маневровые составы, локомотивы) в пределах станции и на подходах к ней производится с помощью поездных и маневровых светофоров. Движение объектов осуществляется по маршрутам, установленным дежурным по станции (ДСП). В разработанной модели управление движением транспортных единиц выполняет ЛВМ, который в процессе моделирования с помощью моторных элементов ИМ готовит маршруты и управляет светофорами станции. В МСУП маршрут движения представляет собой ориентированный путь на графе D , начальной v_n и конечной v_k вершинами которого являются вершины подмножества V^C (светофоры), т. е.

$$v_n = v_b^c, v_k = v_e^c, b \neq e.$$

Отдельный маршрут в МСУП представляется структурой

$$M = \{v_n, v_k, S, Q\}, \quad (2.6)$$

где S – список, каждый элемент которого включает идентификатор СП N_s , входящего в маршрут, и его положение P_s (2.3) в маршруте;

Q – список путевых и стрелочных секций, занятых в маршруте

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}, \quad (2.7)$$

где m – количество изолированных секций в маршруте.

В существующих системах станционной автоматики исключена возможность одновременной установки нескольких маршрутов вследствие наличия только одной наборной группы реле, которая освобождается лишь после полного замыкания маршрута или отмены его набора. Для имитации функционирования наборной группы реле в МСУП структура M является динамической и обнуляется после установки и замыкания очередного маршрута: $v_n \leftarrow 0$, $v_k \leftarrow 0$, $S \leftarrow 0$, $Q \leftarrow 0$. Формирование структуры M осуществляется каждый раз при установке нового маршрута движения.

При ручном режиме задания маршрутов (система ЭЦ) все стрелки, входящие в маршрут, предварительно должны быть установлены в нужное положение. Команда на установку маршрута передается в МСУП после имитации нажатия кнопки светофора, соответствующего вершине v_b^c , в информационной модели ФМС. При маршрутном управлении (система МРЦ) команда на установку маршрута поступает в МСУП после имитации нажатия кнопок начального и конечного светофоров маршрута (вершины v_b^c и v_e^c орграфа D) в ИМ. Стрелки при этом переводятся в нужное положение непосредственно при установке маршрута.

После получения команды на установку маршрута в МСУП выполняется проверка свободности наборной группы ($v_n = 0$). Если наборная группа занята ($v_n \neq 0$), процедура установки нового маршрута прекращается. В противном случае осуществляется обход орграфа D в направлении, соответствующем направлению начального светофора $d_c \in v_n$ (2.4). В процессе набора контролируется текущее состояние стрелочных и путевых ИС, входящих в маршрут, а также положение СП по маршруту.

При установке поездных маршрутов ($T_c = 2$, $T_c \in v_n$) все ИС должны быть свободны от подвижного состава и не замкнуты в других маршрутах, т. е. $P_r = 0$ для всех $q_i \in M$. При установке маневровых маршрутов ($T_c = 1$, $T_c \in v_n$) все ИС должны быть не замкнуты в других

маршрутах, т. е. $P_r \neq 2$ для всех $q_i \in \mathbf{M}$. Проверка указанных условий осуществляется в процессе обхода орграфа D при переходе от одной вершины к другой:

– для вершин S -типа (стрелочных переводов) проверяется состояние стрелочной ИС с номером R_s (2.3);

– для вершин C -типа (светофоров и изолированных стыков) проверяется состояние ИС с номером R_c или R_n (2.4) в зависимости от направления обхода графа D .

Далее рассмотрен порядок формирования маршрута \mathbf{M} при ручном и маршрутном режимах управления, а также при автоматическом управлении моделью.

2.3.5. Формирование маршрутов движения при ручном режиме управления

В этом случае при задании маршрута движения вначале необходимо установить все стрелки, входящие в маршрут, в нужное положение. С этой целью в информационной модели ФМС предусматриваются специальные моторные элементы управления, позволяющие имитировать индивидуальный перевод стрелок. После этого ЛВМ воздействует в ИМ на моторный элемент (кнопку) начального светофора, соответствующего вершине v_b^c графа D , тем самым инициируя передачу в МСУП команды на установку маршрута.

В случае свободности наборной группы выполняется имитация ее занятия: $v_n \leftarrow v_b^c$, $v_n \in \mathbf{M}$. Поиск и формирование установленного маршрута осуществляется в процессе обхода орграфа D , начиная с вершины $v_n \in V^C$, в направлении, соответствующем направлению d_c (2.4) начального светофора. Переход от вершины к вершине осуществляется в соответствии с их связями в орграфе и текущим положением СП.

В процессе обхода графа D выполняется проверка состояния стрелочных и путевых ИС, а также контролируется правильность установки пошерстных стрелочных переводов. Проверка положения стрелочных переводов осуществляется в том случае, если вершина, инцидентная текущей v_i , является вершиной S -типа v_j^s и соответствует пошерстной стрелке, т. е.:

- если $d_c = 0$, $d_c \in v_n$ (четное направление маршрута), $u_{n2} \neq 0$, $u_{n2} \in v_j^s$;
- если $d_c = 1$, $d_c \in v_n$ (нечетное направление маршрута), $u_{ч2} \neq 0$, $u_{ч2} \in v_j^s$.

При этом проверяется соответствие текущего положения пошерстного СП требуемому:

1) для вершин S -типа v_i^s (стрелочные переводы) пошерстный СП, соответствующий вершине v_j^s , связанной с вершиной v_i^s , должен находиться в положении, которое задано одним из элементов списка Z_s (2.3). Элемент списка Z_s определяется в зависимости от направления устанавливаемого маршрута M и текущего положения P_s стрелки, соответствующей вершине v_i^s ;

2) для вершин C -типа v_i^c (светофоры и изолированные стыки) пошерстный СП, соответствующий вершине v_j^s , которая связана с вершиной v_i^c , должен находиться в положении Z_{c1} при четном направлении устанавливаемого маршрута M или в положение Z_{c2} при его нечетном направлении (2.4).

Если указанные условия проверки не выполняются, процедура обхода графа D прекращается. При этом осуществляется освобождение наборной группы: $v_n \leftarrow 0$.

На каждом шаге обхода орграфа выполняется формирование маршрута M (2.6):

1) если v_i является вершиной S -типа, к списку ИС $Q \in M$ (2.7) дописывается номер стрелочной секции $R_{s(1)}$: $m \leftarrow m + 1$, $Q[m] \leftarrow R_s$;

2) если v_i является вершиной C -типа, к списку ИС $Q \in M$ дописывается номер ИС R_c или R_n (2.4) в зависимости от направления обхода графа D : $m \leftarrow m + 1$, $Q[m] \leftarrow R_c$ (четный маршрут), $Q[m] \leftarrow R_n$ (нечетный).

Поиск маршрута (обход графа D) прекращается в следующих случаях:

1) очередной вершине v_j соответствует светофор, а приоритет этой вершины не ниже приоритета начальной вершины v_n ; приоритет определяется типом светофора T_c (2.4):

$$(v_j \in V^C) \wedge (T_c(v_j) \geq T_c(v_n));$$

2) очередной вершине v_j соответствует изолированный стык, который не имеет исходящей дуги в направлении установки маршрута;

3) очередная ИС Q_l поездного маршрута \mathbf{M} занята или замкнута в другом маршруте:

$$(T_c(v_n) = 2) \wedge (P_s(Q_l) \neq 0);$$

4) очередная ИС Q_l маневрового маршрута \mathbf{M} замкнута в другом маршруте:

$$(T_c(v_n) = 1) \wedge (P_s(Q_l) = 2);$$

5) очередная вершина v_j соответствует пошерстному СП, положение которого не обеспечивает связь с текущей вершиной v_i (стрелочный перевод установлен «на взрез»).

В первых двух случаях начальный светофор маршрута открывается, а на мнемосхеме ИМ подсвечивается соответствующий маршрут движения. В остальных случаях фиксируется ошибка, светофор не открывается и выполняется обнуление набранного маршрута \mathbf{M} .

При установке маршрута выполняется корректировка параметров начального светофора и изолированных секций, в т. ч.:

1) в качестве конечной вершины маршрута \mathbf{M} устанавливается вершина S -типа $v_e^c \in V^C$, при достижении которой был закончен обход орграфа D : $v_k \leftarrow v_e^c$;

2) номера ИС, входящих в установленный маршрут, записываются в список \mathbf{M}_c (2.4) для вершины, соответствующей начальному светофору маршрута: $\mathbf{M}_c \leftarrow \mathbf{Q}$, $\mathbf{M}_c \in v_n$, $\mathbf{Q} \in \mathbf{M}$. Данный список \mathbf{M}_c используется для размыкания ИС при необходимости отмены маршрута;

3) состояние начального светофора маршрута изменяется на решающее:

$$T_c(v_n) = 1 \Rightarrow P_c = 1, P_c \in v_n - \text{установлен маневровый маршрут};$$

$$T_c(v_n) = 2 \Rightarrow P_c = 2, P_c \in v_n - \text{установлен поездной маршрут};$$

4) ИС маршрута \mathbf{M} замыкаются:

$$(R_k = Q_l, k = 1, \dots, n_r, l = 1, \dots, m) \wedge (P_r(R_k) \neq 1) \Rightarrow P_r(R_k) = 2.$$

После замыкания маршрута структура \mathbf{M} обнуляется: $v_n \leftarrow 0$, $v_k \leftarrow 0$, $S \leftarrow 0$, $Q \leftarrow 0$.

2.3.6. Формирование маршрутов движения при маршрутном режиме управления

При маршрутном режиме управления (система МРЦ) приготовление маршрутов движения упрощается. Для установки маршрута необходимо указать точки его начала и конца; при этом все стрелки маршрута автоматически устанавливаются в нужное положение. В процессе моделирования ЛВМ с помощью предусмотренных в ИМ моторных элементов имитирует нажатие кнопок начального (вершина v_b^c), а затем конечного (вершина v_e^c) светофоров маршрута. После этого из ИМ в МСУП передается команда на установку маршрута.

В МСУП выполняется начальная проверка правильности действий ЛВМ при задании маршрута по следующим условиям:

1) $T(v_b^c) = T(v_e^c)$ – тип начального и конечного светофоров должен совпадать;

2) $d(v_b^c) \neq d(v_e^c)$ – направления начального и конечного светофоров совпадать не должны;

3) наборная группа должна быть свободна.

При несоблюдении этих условий процедура установки маршрута прекращается и фиксируется ошибка. В противном случае имитируется занятие наборной группы реле: $v_n \leftarrow v_b^c$, $v_k \leftarrow v_e^c$, $v_n \in \mathbf{M}$, $v_k \in \mathbf{M}$, после чего выполняется процедура формирования маршрута, которая осуществляется в три этапа.

На первом этапе выполняется обход графа D в направлении начального светофора маршрута $d_c \in v_n$. При этом определяется возможность построения на графе пути от вершины v_n к вершине v_k . С этой целью для вершины v_n строится дерево маршрутов, где каждому узлу соответствует определенная вершина графа D . Переход от

вершины к вершине осуществляется в соответствии с их связями. Процедура поиска пути на графе D является рекуррентной; при этом для всех узлов дерева маршрутов проверяется возможность построения пути от текущей вершины к вершине v_k . Для вершин, соответствующих противошерстным СП, проверяется возможность достижения вершины v_k в случае их установки как по прямому, так и по боковому пути. Для примера, на рис. 2.8 приведены фрагмент схемы станции (а) и соответствующее ей дерево маршрутов (б), которое строит МСУП при формировании маршрута из Б на путь № 5 ($v_n = 202$, $v_k = 207$).

Процедура поиска пути от текущего узла v_j к конечной вершине маршрута v_k прекращается в следующих случаях:

1) если очередной узел дерева v_{j+1} соответствует вершине C -типа, приоритет которой $T_c(v_{j+1})$ не ниже приоритета начальной вершины (светофора) $T_c(v_n)$, а направление $d_c(v_{j+1})$ светофора, соответствующего узлу v_{j+1} , не совпадает с направлением начального светофора маршрута $d_c(v_n)$, т. е.:

$$\left[v_{j+1} \in V^C \right] \wedge \left[T_c(v_{j+1}) \geq T_c(v_n) \right] \wedge \left[d_c(v_{j+1}) \neq d_c(v_n) \right];$$

2) если очередной узел дерева v_{j+1} соответствует вершине v_k .

В первом случае осуществляется возврат к предыдущему узлу дерева маршрутов, который соответствует противошерстному СП, и процедура поиска пути от этого узла к вершине v_k выполняется по другой ветви орграфа (по боковому пути СП). Во втором случае фиксируется факт существования пути $v_n \rightarrow v_k$ и обход орграфа в прямом направлении прекращается. Порядок движения по орграфу D при поиске пути $202 \rightarrow 207$ приведен на рис. 2.8, в.

На втором этапе выполняется движение по графу D в обратном направлении – от вершины v_k к вершине v_n . Переход осуществляется по тем вершинам, для которых была подтверждена возможность построения пути от данной вершины к вершине v_k . Порядок движения по орграфу D в обратном направлении при формировании маршрута $202 \rightarrow 207$ также приведен на рис. 2.8, в.

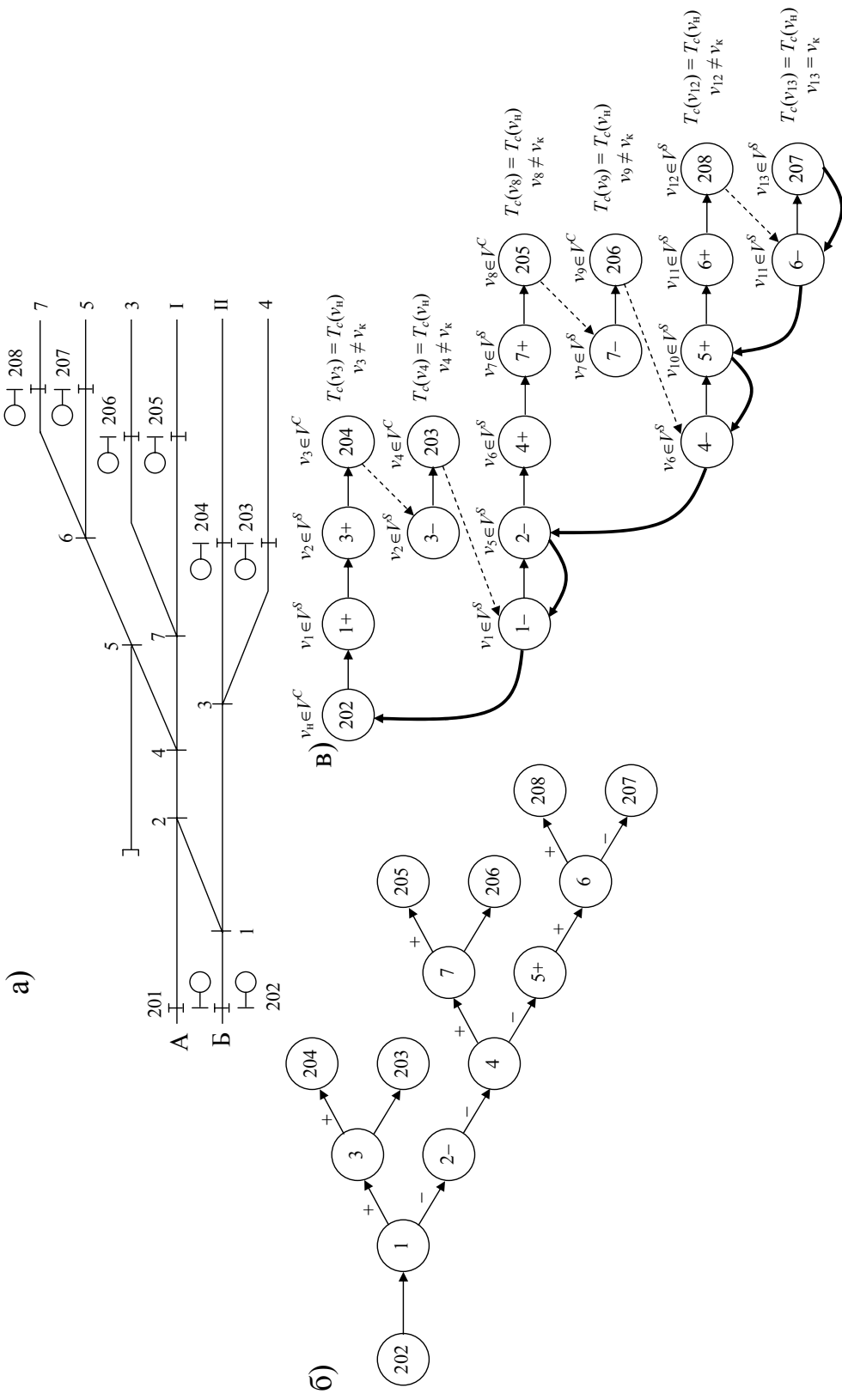


Рис. 2.8 Порядок построения маршрута в МСУП:

a – схема путевого развития; *б* – дерево маршрутов для вершины $v_h = 202$;

ε – порядок обхода орграфа *D* при формировании маршрута

В процессе обратного движения по графу выполняется формирование списков \mathbf{S} и \mathbf{Q} для устанавливаемого маршрута \mathbf{M} (2.7). В список \mathbf{S} записываются номера N_s всех вершин S -типа (стрелок), по которым осуществляется переход при движении по графу в обратном направлении. Для вершин, соответствующих противошерстным СП, в качестве параметра P_s записывается то положение, которое обеспечивает построение пути от данной вершины к вершине v_k . Для вершин, соответствующих пошерстным СП, значение параметра P_s определяется из условия исключения установки стрелочного перевода «на взрез». Так, для схемы, представленной на рис. 2.8, список \mathbf{S} , полученный при формировании маршрута $202 \rightarrow 207$, выглядит следующим образом:

$$\mathbf{S} = [\{N_s, P_s\}] = [\{6, 1\}; \{5, 0\}; \{4, 1\}; \{2, 1\}; \{1, 1\}].$$

В список \mathbf{Q} записываются номера ИС, входящих в маршрут. При этом выполняется проверка состояния этих ИС. Если условия проверки не выполняются, установка маршрута прерывается, а набранный маршрут \mathbf{M} обнуляется.

На третьем этапе для стрелок с номерами, указанными в списке $\mathbf{S} \in \mathbf{M}$, осуществляется проверка соответствия их текущего положения требуемому, которое определяется значениями соответствующих параметров P_s списка \mathbf{S} . При необходимости осуществляется установка этих СП в нужное положение. После того как все стрелки маршрута установлены в необходимое положение, начальный светофор открывается и происходит замыкание установленного маршрута. Корректировка параметров светофора и изолированных секций маршрута при этом выполняется так же, как и при ручном режиме.

Светофор перекрывается после занятия (поездной светофор) или освобождения (маневровый светофор) изолированной секции R_c (2.4). Размыкание изолированных секций маршрута происходит последовательно по мере их освобождения подвижным составом.

2.3.7. Формирование списка маршрутов движения поездов и маневровых составов

Для ускорения процесса эргатического моделирования в некоторых случаях целесообразным является предварительное получение списка всех возможных маршрутов передвижения в пределах станции и на подходах к ней [78, 82]. Для автоматического построения указанного списка маршрутов используется ГМПП станции в виде ориентированного графа G (см. п. 2.2). При этом парк станции разбивают на отдельные горловины. При поиске маршрута M_i выполняется обход графа G в сторону, соответствующую направлению установки сигнала v_n , пока не будет найден сигнал v_k с противоположным направлением установки или с более высоким приоритетом T_c , чем у вершины v_n (2.4). При этом в соответствующие списки данного маршрута (2.6) заносятся номера изолированных секций (список Q), стрелочных переводов и их положений в маршруте (список S). Поиск маршрутов осуществляется отдельно в каждой горловине парка станции.

В результате такого обхода графа G для каждой вершины v_n формируется дерево маршрутов P , где каждому узлу дерева соответствует идентификатор определенной изолированной секции R_i (2.5). При этом один узел является корнем дерева, а остальные узлы разбиты на $m > 0$ поддеревьев P_1, P_2, \dots, P_m . Узлы, не имеющие поддеревьев (листья), являются конечными точками маршрута. Упорядоченное множество деревьев, построенных для всех начальных точек маршрутов, определим как лес. На рис. 2.9 приведен пример горловины станции, а также соответствующий ей лес маршрутов.

При этом нужно отметить, что некоторые узлы, не имеющие поддеревьев (листья), могут иметь одинаковую нумерацию (например, на рис. 2.9, б дважды встречаются листья с номером 2005). Подобные случаи свидетельствуют о наличии в горловине вариантных маршрутов. Общее число листьев во всех деревьях соответствует числу возможных маршрутов n в горловине (для леса маршрутов, приведенного на рис. 2.9, $n = 4$).

На основании сформированных деревьев P_m получают списки маршрутов. В дальнейшем выполняют технологический анализ полученных маршрутов, исключая неиспользуемые по тем или иным при-

чинам. Одновременно маршруты классифицируются по категориям (приема, отправления с разбивкой по направлениям, а также маневровые с разделением по их специализации – заезд, надвиг, перестановка и др.). При этом маршруты каждой такой группы при необходимости сортируют в порядке предпочтения, учитывая при этом варианты маршруты. Обычно предпочтение отдается маршрутам, имеющим наименьшее число враждебных пересечений с другими маршрутами. В группе маршрутов приема поездов с некоторого направления предпочтение отдают маршрутам на специализированные пути и т. д. Указанная операция должна выполняться опытным технологом при настройке модели, поскольку она плохо поддается формализации.

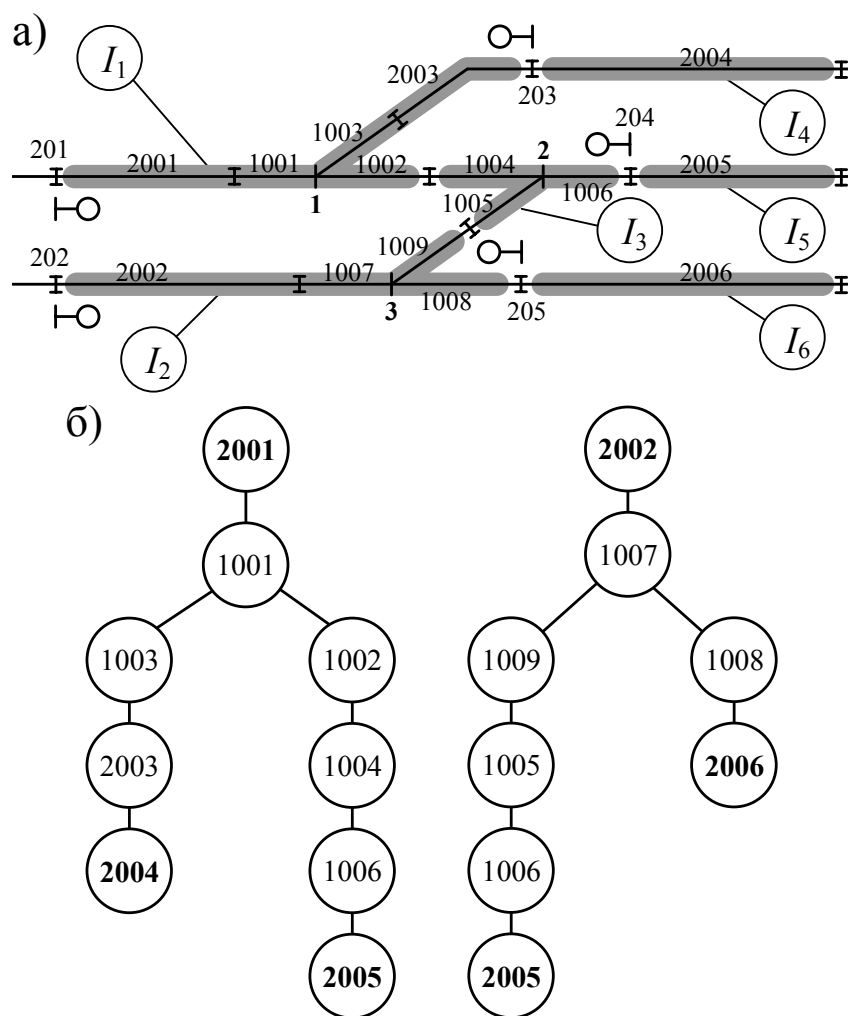


Рис. 2.9. Лес маршрутов горловины парка станции:
 а – горловина станции; б – лес маршрутов, соответствующий горловине

Разработанная модель системы управления перемещениями реализована в виде программного модуля Builder C++ с использованием объектно-ориентированного подхода. Приведенная методика построения такой модели является универсальной и позволяет адекватно моделировать работу систем станционной автоматики для любых станций.

2.4. Модель технологического процесса станции

2.4.1. Общие принципы построения модели

Базовым модулем в общей функциональной модели железнодорожной станции является модель технологического процесса. МТП станции содержит данные об обслуживаемых на станции объектах и предназначена для моделирования их обслуживания с учетом очередности выполнения технологических операций, их взаимной обусловленности и продолжительности, а также для моделирования перемещений объектов в пределах станции и на подходах к ней.

Существует множество подходов к формализации технологических процессов работы железнодорожных станций: например, в [8, 12, 21, 25] при моделировании технологических процессов применяются методы теории вероятности и математической статистики; в ряде работ [4, 14, 17, 19, 28, 49] для формализации технологии работы станций предлагается использовать методы теории массового обслуживания. Формализация технологических процессов на основе марковских случайных процессов предложена в [35–38]; автоматная модель технологии приведена в [33]. В работах [41–43] технологический процесс работы станции формализован на основе сетей Петри; операционный метод формализации предложен в [30, 31]. Формализация на основе метода динамики средних используется в [36]; в [48] для моделирования технологии работы станций предлагается применять генетические алгоритмы. В работах [23, 50] моделирование технологического процесса выполняется с использованием алгоритмического подхода. Следует отметить, что для решения поставленных авторами задач модель технологического процесса должна быть эргатической и обеспечивать непосредственное участие в моделировании

человека-оператора (ЛВМ), выполняющего функции диспетчера станции; при этом должна быть обеспечена возможность его интерактивного взаимодействия с непосредственными исполнителями для контроля текущего положения и управления технологическим процессом работы станции. Однако, как показал анализ (см. гл. 1) в существующих моделях железнодорожных станций участие диспетчерского персонала либо не учитывается вовсе, либо моделируется по упрощенным алгоритмам. В этой связи авторами был разработан новый подход к формализации технологических процессов железнодорожных станций, соответствующий предложенной концепции эргатического моделирования [69, 75, 77, 80, 81].

В разработанной модели станция или ее отдельный технологический комплекс рассматривается как управляемая многофазная многоканальная СМО. В указанной СМО входящий поток образуют объекты, требующие обслуживания на станции (поезда, составы, локомотивы). Фазами обслуживания являются отдельные технологические операции (закрепление состава, технический осмотр и др.), которые выполняются в определенной последовательности в соответствии с технологическим процессом. Продолжительности технологических операций с объектами моделируются как случайные величины (СВ), параметры которых зависят от характеристик каждого объекта. Обслуживающими устройствами являются исполнители технологических операций (маневровые локомотивы, сортировочные горки, бригады ПТО и др.). Дисциплина обслуживания объектов (очередность обработки) устанавливается ЛВМ.

2.4.2. Модели обрабатываемых объектов

В качестве обрабатываемых объектов в МТП рассматриваются локомотивы и составы. Поезда рассматриваются как объединение этих двух объектов. Каждый объект представляется структурой

$$\left. \begin{aligned} O_j &= \{N_o, T_{вх}, v, \mathbf{P}, s, \mathbf{U}, \mathbf{Q}\}, \\ j &= 1, 2, \dots, n_o, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

где N_o – идентификатор объекта;

$T_{вх}$ – момент появления объекта в модели;

- v – тип объекта (пассажирский поезд, грузовой транзитный поезд, грузовой поезд в расформирование и т. д.);
- \mathbf{P} – множество параметров объекта;
- s – текущее состояние объекта, которое определяет фазу технологического процесса его обработки;
- \mathbf{U} – список идентификаторов исполнителей, которые после окончания выполнения некоторых операций с объектом находятся в ожидании начала выполнения других операций с этим объектом;
- \mathbf{Q} – список технологических операций, выполняемых с объектом в текущий момент времени;
- n_0 – общее число обрабатываемых объектов на станции за период моделирования.

Во множестве \mathbf{P} выделено два подмножества:

- а) \mathbf{P}^R – подмножество технических параметров;
- б) \mathbf{P}^T – подмножество технологических параметров.

Технические параметры подмножества \mathbf{P}^R необходимы для моделирования занятия путей подвижным составом и его перемещений (длина объекта, скорость, ускорение разгона и торможения, направление движения, категория передвижения). Значения этих параметров зависят от типа объекта. Технологические параметры подмножества \mathbf{P}^T используются при моделировании технологических процессов обслуживания объектов (номер поезда, его индекс, путь приема, норма закрепления и др.).

Каждый элемент списка \mathbf{Q} (2.8) представляется как:

$$q_l = \left. \begin{array}{l} \{q_w, q_e, f, t_{\text{ок}}\}, \\ l = 1, 2, \dots, n_q, \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

- где q_w – идентификатор операции;
- q_e – идентификатор исполнителя, выполняющего данную операцию с объектом в текущий момент времени;
- f – признак начала операции;
- $t_{\text{ок}}$ – момент окончания операции;
- n_q – общее число выполняемых с объектом операций (в начале моделирования $n_q = 0$ для всех объектов).

В процессе моделирования работы станции список Q изменяется в следующих случаях:

- при передаче команды от ЛВМ на начало определенной операции с объектом;
- по окончании выполнения какой-либо операции с объектом.

Параметр f представляет собой булеву переменную, которая характеризует текущее состояние операции q_w с объектом Q_j . При этом $f = 0$, если операция q_w может быть начата с объектом Q_j и ожидает освобождения исполнителя соответствующей специализации, и $f = 1$, если операция q_w выполняется.

Список идентификаторов исполнителей U (2.8) корректируется по мере их занятия и освобождения при выполнении операций с данным объектом.

Заявки на обслуживание могут поступать на станцию с нескольких входов (примыкающе станции, подъездные пути и др.). Момент поступления заявки Q_j с каждого h -го входа определяется с помощью выражения

$$T_{\text{вх}j} = T_{\text{вх}(j-1)} + \Delta t_h,$$

где Δt_h – случайная величина интервала между заявками (объектами), поступающими на станцию с h -го входа.

Величина Δt_h моделируется по заданному закону распределения. Одновременно с моментом появления заявки $T_{\text{вх}j}$ моделируется ее категория ν и параметры P (2.8). С этой целью в состав ФМС введен генератор входящего потока заявок (см. п. 2.7). Моменты $T_{\text{вх}j}$ и параметры объектов также могут устанавливаться расписанием, которое формируется в виде файла данных перед выполнением моделирования.

2.4.3. Формализация технологических процессов обработки объектов на станции

Технологический процесс обработки объектов на станции представляет собой комплекс различных технологических операций w_i , каждая из которых должна быть выполнена прежде, чем объект

покинет систему обслуживания. Технология обслуживания объектов может быть формализована на основе методов теории сетевого планирования и управления в виде структурно-временной таблицы комплекса работ, которая содержит список выполняемых с объектом технологических операций, а также данные об их взаимной обусловленности [91]. Строка таблицы характеризует каждую элементарную операцию ТП обслуживания объекта и в разработанной модели представляется структурой [69, 75, 81]:

$$W_i = \left\{ N_w, \mathbf{w}, p, f, \rho, \mu, M[t], \sigma_t \right\}, \quad (2.10)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_w,$$

где N_w – идентификатор операции;

\mathbf{w} – список операций, по окончании которых может быть начата данная операция

$$\mathbf{w} = \{w_{a_1}, w_{a_2}, \dots, w_{a_r}\}, \quad a_1 < a_2 < \dots < a_r < i;$$

p – специализация исполнителя данной операции, $p = 1, \dots, c$;

f – признак закрепления исполнителя за объектом для выполнения последующих операций ($f = 0$ – исполнитель освобождается после выполнения операции, $f = 1$ – исполнитель ожидает выполнения других операций с данным объектом);

ρ – закон распределения случайной величины продолжительности операции t ;

μ – математическая модель, определяющая характер зависимости продолжительности операции от параметров обслуживаемого объекта;

$M[t]$ – математическое ожидание случайной величины t ;

σ_t – среднеквадратическое отклонение случайной величины t ;

n_w – общее количество операций в комплексе.

Продолжительность выполнения каждой операции рассматривается как случайная величина с заданным законом распределения (параметр ρ). Значение ρ , а также параметры $M[t]$, σ_t используются для моделирования случайной величины t при каждой реализации обслу-

живания объекта. Конкретные значения этих параметров устанавливаются на основе статистической обработки результатов натурных исследований технологического процесса обслуживания объектов на станции.

Следует отметить, что продолжительность выполнения некоторых операций зависит от параметров объектов (например, продолжительность технического осмотра пропорциональна числу вагонов в составе). В этой связи для моделирования продолжительности таких операций должны быть получены математические модели (параметр μ (2.10)), устанавливающие связь величины t_i с параметрами объекта (зависимости вида $t_i = f_i(X)$). Такие модели могут быть определены на основе регрессионного анализа данных, полученных в результате исследований, предварительно выполненных на реальной станции. В этом случае в качестве параметра μ указывается номер соответствующей модели (если t_i не зависит от параметров объекта, $\mu = 0$). В процессе моделирования с помощью модели μ_i устанавливается значение параметров $M[t]$ и σ_i для операции w_i , а конкретное значение продолжительности t_i определяется с учетом этих параметров и закона распределения ρ_i .

Продолжительность операций, которые связаны с перемещениями подвижного состава (например, заезд маневрового локомотива, надвиг и роспуск составов), определяют путем имитационного моделирования движения соответствующих объектов. При этом значения параметров μ , ρ , $M[t]$ и σ_i в (2.10) принимаются равными нулю. Для новых станций модели и параметры для расчета времени выполнения операций могут быть установлены по нормативным данным и типовым технологическим процессам.

Поток заявок, поступающих в систему, является неоднородным (пассажирские поезда, грузовые транзитные и поезда в расформирование, угловые и местные передачи, локомотивы и др.). Технология обработки заявок разного рода различна, и поэтому в МТП для каждого типа объектов v (2.8) предусмотрено выполнение отдельного комплекса технологических операций w_v ($v = 1, 2, \dots, n_v$; здесь n_v – возможное количество типов объектов, обслуживаемых на станции).

Обслуживающими каналами в СМО являются исполнители различной специализации (сигналист, бригада ПТО, маневровый

локомотив и др.); каждый исполнитель в МТП представляется структурой:

$$\left. \begin{aligned} E_k &= \{N_e, p, \mathbf{D}\}, \\ k &= 1, 2, \dots, n_e, \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где N_e – идентификатор исполнителя;

p – специализация исполнителя;

\mathbf{D} – очередь заданий на выполнение операций;

n_e – общее количество исполнителей, участвующих в технологическом процессе работы станции.

Принято, что каждую элементарную операцию w_i может выполнять исполнитель строго определенной специализации (например, закрепление состава осуществляет сигналист, осмотр вагонов – бригада ПТО, роспуск состава – маневровый локомотив и сортировочная горка и т. д.). В то же время, исполнитель данной специализации может выполнять несколько различных элементарных операций (например, сигналист выполняет закрепление состава и уборку тормозных башмаков).

Каждый элемент очереди \mathbf{D} включает идентификатор операции N_w (2.10) и идентификатор объекта N_o (2.8), с которым эта операция должна быть выполнена. Очередь \mathbf{D} корректируется при получении исполнителем команды от ЛВМ на выполнение какой-либо операции и по окончании выполнения этой операции. Исполнитель E_k считается занятым, если в текущий момент системного времени T_c он выполняет какую-либо технологическую операцию w_i или находится в ожидании выполнения следующих операций с тем же объектом (например, горочный локомотив после прицепки к составу ожидает начала роспуска этого состава).

Для учета занятости исполнителей обслуживанием заявок в МТП введен динамический список, содержащий в качестве элементов идентификаторы исполнителей r , которые не заняты выполнением какой-либо операции в текущий момент времени:

$$\mathbf{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, \quad (2.12)$$

где m – общее число свободных исполнителей в текущий момент времени.

Список \mathbf{R} изменяется в процессе моделирования работы станции при занятии или освобождении исполнителей. В начале моделирования все исполнители считаются свободными ($m = n_e$).

2.4.4. Управление процессом обслуживания объектов при моделировании

Как показали исследования, непосредственное использование структурно-временных таблиц для моделирования технологических процессов обслуживания объектов на станциях имеет ряд недостатков. В частности, с помощью одной подобной таблицы не представляется возможным моделировать процессы, имеющие различные варианты очередности выполнения отдельных операций, выбор которых осуществляется ЛВМ. Кроме того, при использовании такого подхода трудно реализовать в МТП правильное восприятие управляющих команд ЛВМ, которые могут поступить в момент выполнения любой из операций комплекса. Следует заметить, что выполнение указанных требований особенно важно при создании эргатических моделей станций. Поэтому вместо непосредственного использования структурно-временных таблиц для моделирования технологических процессов обслуживания объектов на станциях предлагается использовать детерминированные конечные автоматы (КА), которые могут быть синтезированы на основе указанных таблиц.

Детерминированный КА обеспечивает выполнение с каждым объектом всего комплекса технологических операций в соответствии с их взаимной обусловленностью и позволяет имитировать взаимодействие ЛВМ с исполнителями. Формально автомат может быть представлен как [92]

$$A_v = \{X, Z, S, F_z, F_s\}, \quad (2.13)$$

где X, Z – соответственно входной и выходной алфавиты;

S – множество состояний автомата;

F_z, F_s – функции выходов и переходов.

Входной алфавит X автомата включает два подмножества входных сигналов: $X = \{X_1, X_2\}$; здесь X_1 – внешние команды, поступающие от ЛВМ для инициализации определенных технологических

операций с объектом; X_2 – внутренние сигналы, поступающие от объекта после окончания каждой технологической операции.

Каждому символу z_i выходного алфавита Z ставится в соответствие функция Ψ_i , которая должна быть выполнена ФМС в момент поступления в КА входного сигнала x_i . Функции Ψ_i включают наборы команд двух типов: $\Psi_i = \{K_{i1}, K_{i2}\}$; здесь K_{i1} – список команд инициализации отдельных технологических операций с объектом; K_{i2} – список команд и сообщений, которые должны быть переданы структурным моделям ФМС.

Каждое состояние автомата $s_q \in S$ соответствует определенному состоянию ТП обслуживания объекта, которое характеризуется завершенностью каждой технологической операции (не может быть начата, может быть начата или выполняется, закончена). Множество состояний автомата S определяется числом различных фаз обслуживания объекта, которые различаются комбинациями технологических операций, имеющих разную степень завершенности. Построение указанного множества состояний осуществляется на основе анализа сетевого графика, который является графической моделью структурно-временной таблицы комплекса технологических операций обслуживания объекта. ТП обслуживания отдельного объекта моделируется последовательностью переходов КА из одного состояния в другое по мере выполнения предусмотренных операций. В начале моделирования соответствующий КА находится в исходном состоянии s_0 (автомат является инициальным). После выполнения всех операций, предусмотренных ТП, автомат переходит в конечное состояние s_k , после чего соответствующий объект исключается из системы обслуживания.

Функции выходов F_z и переходов F_s автомата A выполняют преобразование входной последовательности сигналов $\mathbf{x}_j = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ в соответствующую выходную последовательность $\mathbf{z}_j = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$. Для формализации различных вариантов технологии обслуживания некоторого объекта используются различные входные последовательности \mathbf{x}_j , $j = 1 \dots r$, каждая из которых переводит КА из состояния s_0 в состояние s_n ; выбор последовательности \mathbf{x}_j осуществляется ЛВМ.

Функции F_z и F_s обычно представляют в виде общей таблицы выходов и переходов, строки которой соответствуют различным состояниям из алфавита S , а столбцы – различным входным символам из алфавита X [92]. В клетку таблицы, находящуюся на пересечении столбца с символом x_k и строки с символом s_k , записывается упорядоченная пара (z_k, s_{k+1}) , где z_k – значение выходной переменной в момент t_k ($z_k \in Z$), а s_{k+1} – состояние КА в момент t_{k+1} ($s_{k+1} \in S$); при этом z_k является списком команд инициализации отдельных технологических операций с объектом либо команд ЛВМ структурным моделям ФМС, разрешающих выполнение некоторых операций. Если функции F_z и F_s не определены для некоторых пар (x_k, s_k) , то соответствующие клетки не заполняются.

В результате анализа таблиц выходов и переходов КА, разработанных для моделирования обслуживания различных объектов на существующих железнодорожных станциях, установлено, что эти таблицы являются сильно разреженными и поэтому табличная форма указанных автоматов для представления в ЭВМ является неэффективной. Как показали исследования, более эффективной формой представления автоматов для моделирования ТП обслуживания объектов является граф переходов [77, 80]. Он представляет собой ориентированный граф, вершины которого взаимно однозначно соответствуют состояниям КА, а дуги – возможным переходам между ними. При этом каждая дуга орграфа имеет обозначение, которое записывается в виде

$$(x_{k1}/z_{k1}) \vee (x_{k2}/z_{k2}) \vee \dots \vee (x_{kr}/z_{kr}),$$

где x_{ki} – входной сигнал КА ($x_{ki} \in X$), при поступлении которого реализуется представленный дугой переход; при этом входной сигнал x_{ki} соответствует внутреннему сигналу от обслуживаемого объекта о завершении операции с номером x_{ki} ($x_{ki} \in X_2$), либо принятой от ЛВМ внешней команде x_{ki} ($x_{ki} \in X_1$);

z_{ki} – выходной сигнал КА ($z_{ki} \in Z$), который инициализирует технологическую операцию с номером z_{ki} либо разрешает

подачу внешней команды z_{ki} из МТП другим структурным моделям ФМС.

Построенный таким образом граф переходов имеет взаимно однозначное соответствие с таблицей выходов и переходов для заданного КА. Для моделирования процессов обслуживания заявок разного типа ν (2.8) были разработаны соответствующие автоматы A_ν (отдельные графы переходов). При этом с помощью одного автомата A_ν выполняется моделирование обслуживания всех заявок ν -го типа, находящихся в системе в текущий момент времени. Текущее состояние автомата s для j -го объекта хранится в модели объекта Q_j (2.8).

В процессе моделирования работы станции ЛВМ с помощью средств, предусмотренных в информационной модели, передает управляющие команды на начало определенных операций с объектами, которые находятся на станции. Функции контроля за правильностью выполнения технологического процесса при моделировании обслуживания объектов различных типов выполняют соответствующие автоматы A_ν (2.13).

Функционирование КА при моделировании технологического процесса может быть представлено в виде упрощенной схемы (рис. 2.10).

В момент времени T_c ЛВМ вводит команду для исполнителя E_k (2.11) на начало операции w_i с объектом ν -го типа Q_j . ФМС выполняет поиск объекта в МТП и производит входной контроль данной команды. При этом проверяется правильность указанных в команде параметров применительно к объекту Q_j (номер поезда, номер пути, количество башмаков и др.). В случае правильной команды (предусмотренной алфавитом X) на вход автомата A_ν подается входной символ x_T , соответствующий команде ЛВМ ($x_T \in X_1$); в противном случае фиксируется ошибка. Порядок обработки входных сигналов $x \in X_1$ приведен на рис. 2.11 (здесь n_s – количество допустимых входных сигналов x_{si} в состоянии s).

В зависимости от текущего состояния s_T (2.8) объекта Q_j , которое соответствует определенному состоянию автомата A_ν , выходная функция $\Psi_T \in Z$ реализует список команд K_1 (разрешение на начало определенных операций с объектом Q_j). Состояние s_j объекта изме-

няется в соответствии с функцией переходов F_s автомата:
 $z_T = F_z(x_T, s_T)$, $s_{T+1} = F_s(x_T, s_T)$.

После поступления разрешения на начало операции w_i для объекта Q_j выполняется корректировка списка Q_j (2.9):

$$l = l + 1, l \in Q_j, q_w(q_l) = N_w, f(q_l) = 0, Q_l \in Q_j, N_w \in w_i.$$

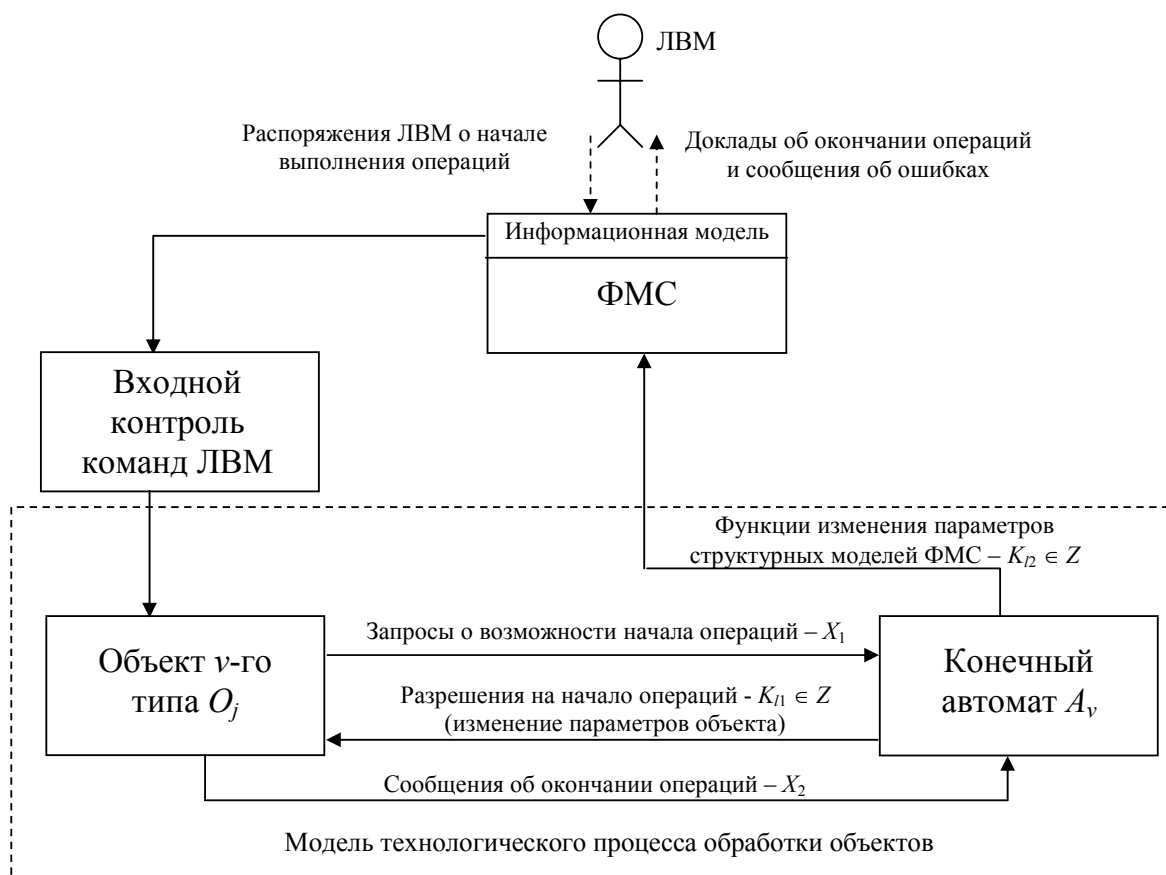


Рис. 2.10. Схема функционирования конечного автомата при моделировании технологического процесса

Кроме того, в очередь \mathbf{D} (2.11) для исполнителя E_k записывается новое задание: $N_w \leftarrow N_{wi}$, $N_o \leftarrow N_{oj}$. Это позволяет моделировать выполнение операции конкретным исполнителем при наличии на станции нескольких исполнителей одинаковой специализации.

По всем заявкам Q_j , находящимся в процессе обслуживания в парке, на каждом шаге системного времени T_c осуществляется проверка хода выполнения технологических операций. При этом по каждой

операции $q_w \in q_l$ в списке Q_j , для которой выполняется условие $f(q_l) = 0$ (операция w_i с идентификатором $N_w = q_w$ может быть начата), проверяется возможность начала ее выполнения. Для выполнения операции w_i необходим свободный исполнитель специализации p_i (2.10). Поиск свободного исполнителя выполняется сначала в списке $U \in Q_j$ (2.8).

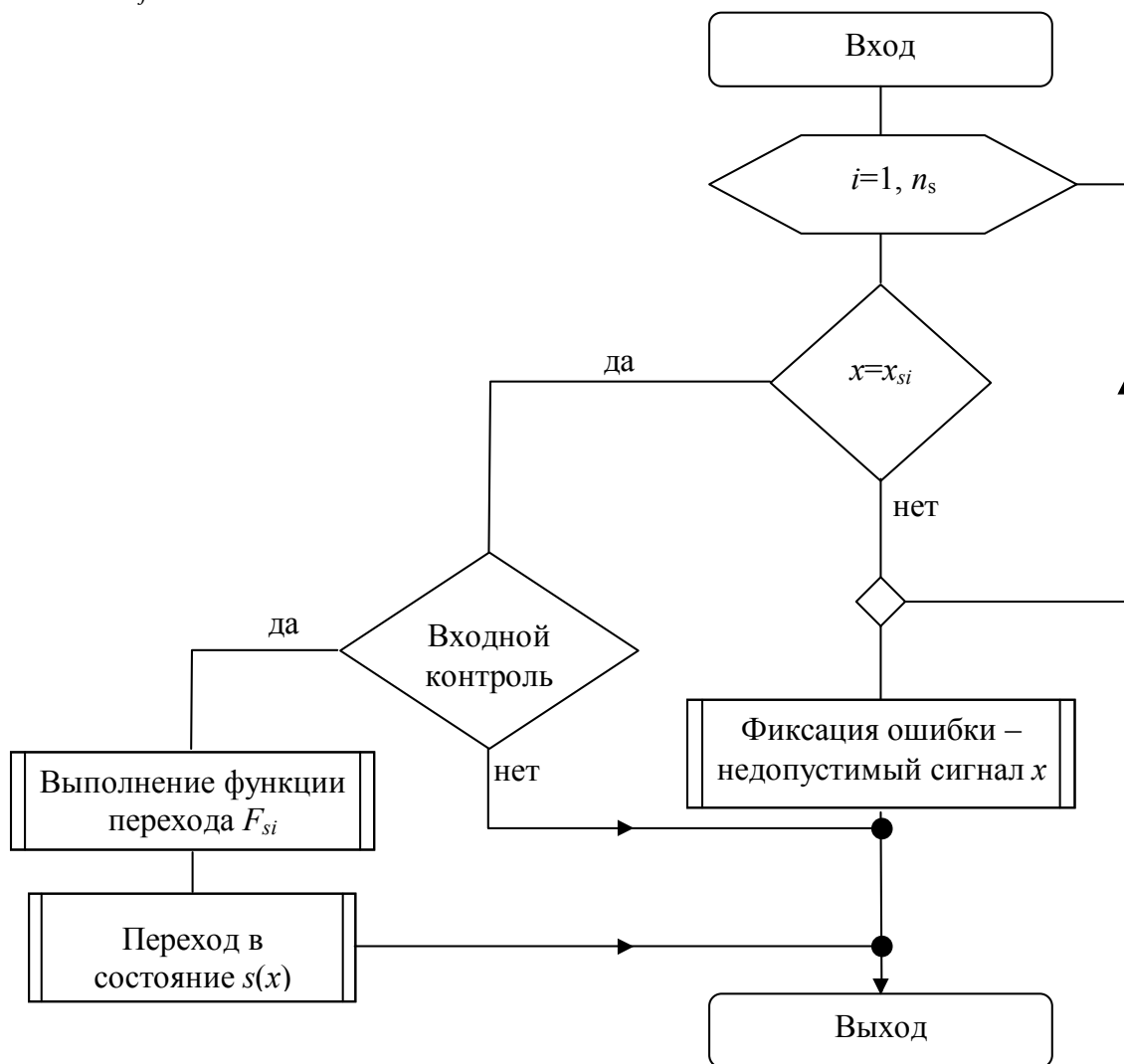


Рис. 2.11. Блок-схема обработки входных сигналов в КА

Если в данном списке нет исполнителя требуемой специализации p_i , то поиск осуществляется среди всех свободных исполнителей парка в списке R (2.12); при этом для каждого свободного исполнителя E_k специализации p_i списка дополнительно проверяется очередь заданий D на соответствие команде ЛВМ. Если имеется свобод-

ный исполнитель p -й специализации с идентификатором N_e ($N_e \in \mathbf{U}$ или $N_e \in \mathbf{R}$), у которого есть задание на выполнение операции w_i с объектом Q_j ($N_w(D) = N_{wi}$, $N_o(D) = N_{oj}$, $\mathbf{D} \in E_k$), то моделируется начало данной операции с этим объектом и определяется ее продолжительность t_i . При этом в списке \mathbf{Q}_j корректируются параметры элемента q_l , соответствующего операции w_i : $q_e(q_l) = N_e$, $f(q_l) = 1$, $t_{ок}(q_l) = T_c + t_i$. Кроме того, идентификатор исполнителя N_e , привлеченного к выполнению операции w_i , исключается из списка \mathbf{U} для данного объекта или из списка \mathbf{R} .

На каждом шаге моделирования по всем заявкам Q_j также осуществляется проверка возможности окончания операций w_i . При этом для каждой начатой операции $q_w(q_l)$ в списке \mathbf{Q}_j (для которой $f(q_l) = 1$) проверяется условие $t_{ок}(q_l) \leq T_c$. Если данное условие выполняется, то соответствующая операция w_i считается выполненной для объекта Q_j , и на вход автомата A_v подается входной символ x_T , свидетельствующий об окончании операции ($x_t \in X_2$). Выходная функция $\Psi_T \in Z$ реализует набор команд K_2 (команды для изменения параметров структурных моделей ФМС), а КА инициирует переход объекта в новое состояние s_{T+1} .

Если после выполнения операции w_i исполнитель E_k не освобождается ($g_i = 1$), в список \mathbf{U} объекта Q_j записывается идентификатор этого исполнителя $N_e \in E_k$; в противном случае идентификатор объекта записывается в список свободных исполнителей \mathbf{R} . Кроме того, для исполнителя E_k обнуляется очередь заданий: $\mathbf{D} \leftarrow 0$, $\mathbf{D} \in E_k$. Завершенная операция $Q_l \in Q_j$ исключается из списка \mathbf{Q}_j для объекта Q_j : $q_l \leftarrow 0$, $l = l - 1$, $q_l \in Q_j$, $l \in Q_j$.

Объект считается обслуженным, если с ним выполнен весь комплекс операций, предусмотренных технологическим процессом. При этом объект достигает конечного состояния s_k , из которого нельзя перейти ни в какое другое, и после этого исключается из системы обслуживания.

Как показал анализ, синтез подобных КА для моделирования ТП обслуживания различных объектов, а также построение

соответствующих таблиц выходов и переходов и оргграфов представляет собой достаточно сложную задачу. В этой связи была разработана методика и соответствующее программное обеспечение для автоматизированного построения графов переходов КА и их реализации в ЭВМ в виде файлов данных [80].

2.4.5. Порядок формализации технологического процесса обслуживания поездов на основе детерминированного конечного автомата

Для иллюстрации методики формализации ТП обслуживания объектов с использованием детерминированных КА рассмотрим пример построения подобного автомата для моделирования технологического процесса обслуживания составов в подсистеме расформирования сортировочной станции. Технология обработки поездов, поступающих в расформирование, формализована на основе структурно-временной таблицы комплекса операций (табл. 2.1).

Каждая строка таблицы соответствует определенной технологической операции (2.10). Номера предшествующих операций указывают на те операции, которые обязательно должны быть выполнены до начала данной. Кроме того, в структурно-временной таблице отражено закрепление отдельных исполнителей за конкретным составом после выполнения определенных операций, когда исполнитель не освобождается и не может перейти к обслуживанию других объектов ($f_i = 1$). Так, поездной локомотив не освобождается после приема поезда ($f_1 = 1$), а ожидает отцепки от состава ($f_4 = 0$); горочный локомотив не освобождается после операции заезда и прицепки к составу ($f_9 = 1$), а только после его роспуска ($f_{11} = 0$). Остальные исполнители освобождаются сразу после завершения текущей операции; при этом они могут в промежутке между отдельными операциями с данным составом выполнять соответствующие операции с другими поездами. Например, сигналист между операциями № 2 и 10 для данного состава может выполнять аналогичные операции с другими составами.

Таблица 2.1

Структурно-временная таблица комплекса операций с составом, прибывшим в расформирование

№ п/п	Операция	Предшеств. операции	Исполнитель	f	Модель для определения времени операции	Параметры операции, мин.	
						M[t]	σ_t
1	Прием поезда	–	Поездной локомотив	1	0	–	–
2	Закрепление состава	1	Сигналист	0	μ_1	–	–
3	Обработка документов	1	Оператор СТЦ	0	3	43,8	6,1
4	Отцепка поездного локомотива	2	Поездной локомотив	0	1	1,0	0
5	Ограждение состава	4	Оператор ПТО	0	1	0,2	0
6	Технический и коммерческий осмотр	5	Бригада ПТКО	0	μ_2	–	–
7	Снятие ограждения	6	Оператор ПТО	0	1	0,2	0
8	Корректирование информации о составе	3, 6	Оператор СТЦ	0	3	6,3	1,4
9	Заезд и прицепка горочного локомотива	7	Горочный локомотив	1	0	–	–
10	Уборка башмаков	9	Сигналист	0	μ_3	–	–
11	Надвиг и роспуск	8, 10	Горочный локомотив	0	μ_4	–	–

Как уже отмечалось, продолжительности выполнения технологических операций моделируются как случайные величины с определенными характеристиками. Кроме того, продолжительность t_i выполнения некоторых операций зависит от параметров объектов, с которыми выполняются эти операции. Соответствующие законы распределения (параметр ρ), его характеристики (параметры $M[t]$, σ_t), а также математические модели вида $t_i = f_i(X)$, устанавливающие связь продолжительности выполнения каждой из операций с параметрами составов (параметр μ), определяются на основе экспериментальных исследований на реальных станциях при идентификации ФМС.

Так, в табл. 2.1 модели $t_i = f_i(X)$ представлены их идентификаторами (μ_1 – операция № 2, μ_2 – операция № 6, μ_3 – операция № 10, μ_4 – операция № 11); вид зависимостей $t_i = f_i(X)$ и численные значения их коэффициентов приведены в п. 4.4. Операции № 3 и 8 (см. табл. 2.1) представляют собой случайные величины с определенным законом распределения и численными параметрами $M[t]$, σ_t (2.10), которые также устанавливаются при идентификации модели (см. п. 4.4). При этом в табл. 2.1 вместо идентификатора модели μ указывают идентификатор закона распределения ρ соответствующей величины: 1 – величина постоянна, 2 – нормальный закон распределения, 3 – логнормальный, 4 – закон распределения Эрланга и др.

Продолжительность операций, которые связаны с перемещениями подвижного состава (№ 1 и 9), определяют путем имитационного моделирования движения соответствующих объектов (см. п. 2.4.6), поэтому в соответствующих строках табл. 2.1 вместо идентификатора модели указывают 0.

Для детального анализа и последующего синтеза конечного автомата технологический процесс обработки составов, формализованный на основе структурно-временной таблицы (см. табл. 2.1), был представлен в виде сетевого графика (рис. 2.12). При этом следует учесть, что продолжительность выполнения некоторых операций ТП является случайной величиной, и поэтому реализации указанного графика для отдельных составов могут отличаться как своими параметрами, так и критическим путем.

На основе анализа ТП обслуживания поездов, прибывающих в расформирование, с использованием разработанной методики была построена таблица выходов и переходов автомата, управляющего в модели станции технологическим процессом обслуживания расформируемых поездов (табл. 2.2).

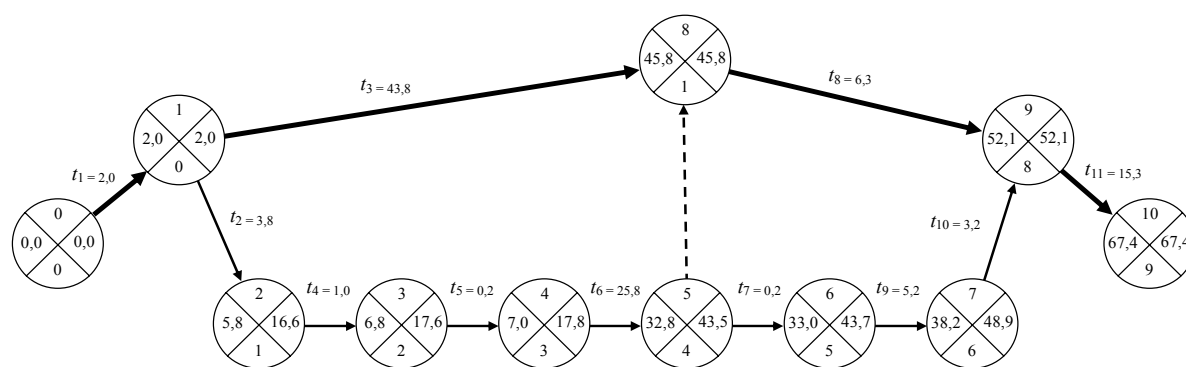


Рис. 2.12. Сетевой график обработки поезда, прибывшего в расформирование

В приведенной таблице входные сигналы X соответствуют 11 внутренним сигналам о завершении технологических операций № 1–11 (см. табл. 2.1) и двум командам от ЛВМ, который подает их для инициализации отдельных операций: 401 – «Прицепить маневровый локомотив», 402 – «Начать надвиг». Автомат имеет 26 внутренних состояний $s \in S$, соответствующих определенной фазе ТП обслуживания объекта, каждая из которых характеризуется стадией выполнения отдельных технологических операций. Предусмотрено три стадии выполнения каждой операции: «завершена», «может быть начата или выполняется» (при наличии свободного исполнителя) и «не начата». Так, в состоянии № 7 завершены операции № 1, 2, 4 и 5, могут быть начаты или выполняются операции № 3 и 6; остальные операции не могут быть начаты в этом состоянии автомата. В начале моделирования ТП обслуживания каждого объекта (расформируемого состава) указанный КА находится в исходном состоянии ($s_0 = 1$); после выполнения всех операций, предусмотренных ТП, автомат переходит в конечное состояние ($s_k = 26$), а соответствующий объект исключается из системы обслуживания.

Таблица выходов и переходов конечного автомата

№ со- стоя- ния	Входные сигналы X														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	401	402		
1	2,3/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	-	3,4/3	2/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	4/5	3,5/6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	4/5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	5/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	-	-	5/8	-	3,6/7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	6/10	-	-	3,7/9	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	-	6/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	7,8/11	-	-	-	3/12	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	7,8/11	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	8/14	7/13	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	8/14	-	-	-	-	-	-	-	-	3,9/15	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	0/16	-	-	-	-	-	-	-	
14	-	-	-	-	-	-	-	0/16	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	8,9/17	-	-	-	-	-	3,10/18	-	-	-	-	-	

№ со- стоя- ния	Входные сигналы X											401	402	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9/19	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	9/19	8,10/20	-	-	-	-	-
18	-	-	8,10/20	-	-	-	-	-	-	3/21	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	10/22	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	10/22	-	8/23	-	-	-	-
21	-	-	8/23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0/24	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	0/24	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11/25
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12/0	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

В каждую клетку таблицы выходов и переходов (см. табл. 2.2), находящуюся на пересечении столбца x_j и строки s_k , записана упорядоченная пара $(z_{kj}, s_{k+1,j})$, где z_{kj} – значение выходной переменной при поступлении в КА входного сигнала x_j , когда тот находится в состоянии s_k , а $s_{k+1,j}$ – новое состояние, в которое КА переходит после приема входного сигнала x_j . Так, в состоянии № 7 на вход КА могут поступить входные сигналы № 3 и 6; в первом случае в соответствующей клетке таблицы записана пара (6/10), что означает инициализацию операции № 6 и переход в новое состояние №10. Во втором случае в соответствующей клетке таблицы записана пара (3, 7/9), что означает инициализацию операций № 3 и 7 и переход в состояние № 9.

На рис. 2.13 приведен ориентированный граф переходов, который однозначно соответствует таблице выходов и переходов рассматриваемого КА. Вершинам графа поставлены в соответствие состояния автомата № 1–26, а дугам – возможные переходы между ними. Дуги графа имеют обозначения x/z ; здесь x – сигнал от обслуживаемого объекта о завершении операции с номером x ($x = 1...11$) либо внешняя команда от ЛВМ ($x = 401...402$), при которых реализуется представленный дугой переход, а z – список номеров технологических операций, выполнение которых может быть начато при этом ($z = 1...11$). Например, в вершине (состоянии) № 7 две исходящих дуги № 7–9 и 7–10, которые имеют обозначения соответственно (6/3,7) и (3/6); первое из них указывает, что при поступлении на вход КА сигнала № 6 (завершение операции № 6) инициализируются операции № 3 и 7 и переход в состояние № 9. Второе обозначение (3/6) указывает, что при поступлении на вход КА сигнала № 3 (завершение операции № 3) инициализируется операция № 6 и переход в состояние № 10.

Построенный граф переходов КА служит основой для формализации ТП обслуживания расформируемого состава в ФМС. При этом построение графа и формирование на его основе данных для моделирования ТП представляет собой достаточно сложную задачу, для решения которой было разработано специальное программное обеспечение (см. гл. 3). Общий вид графа переходов рассматриваемого КА, полученного с использованием средств автоматизированного построения, приведен на рис. 2.14.

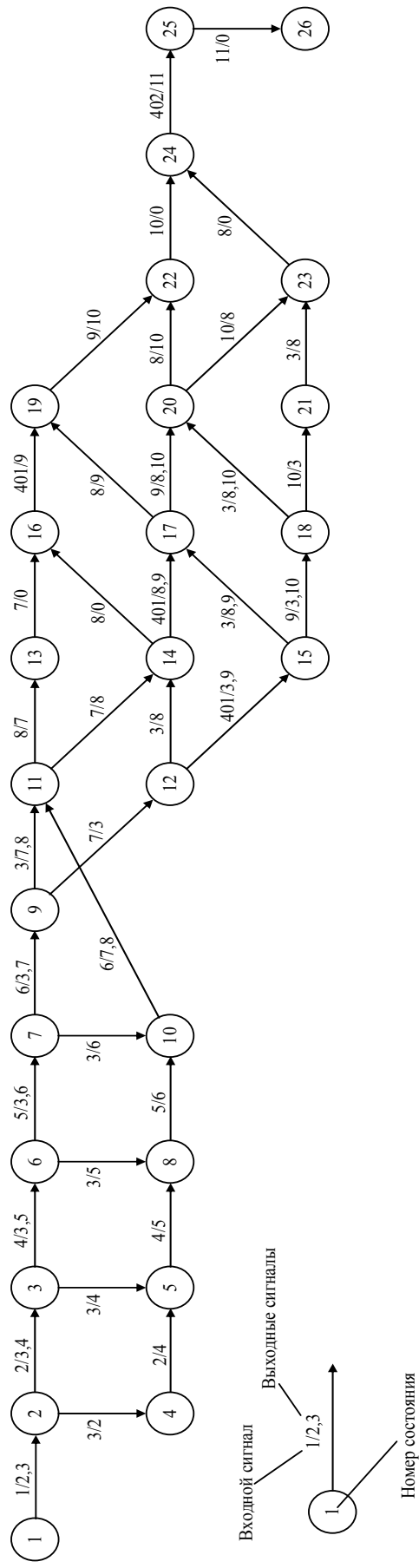


Рис. 2.13. Граф переходов КА для моделирования технологического процесса обслуживания состава, прибывшего в расформирование

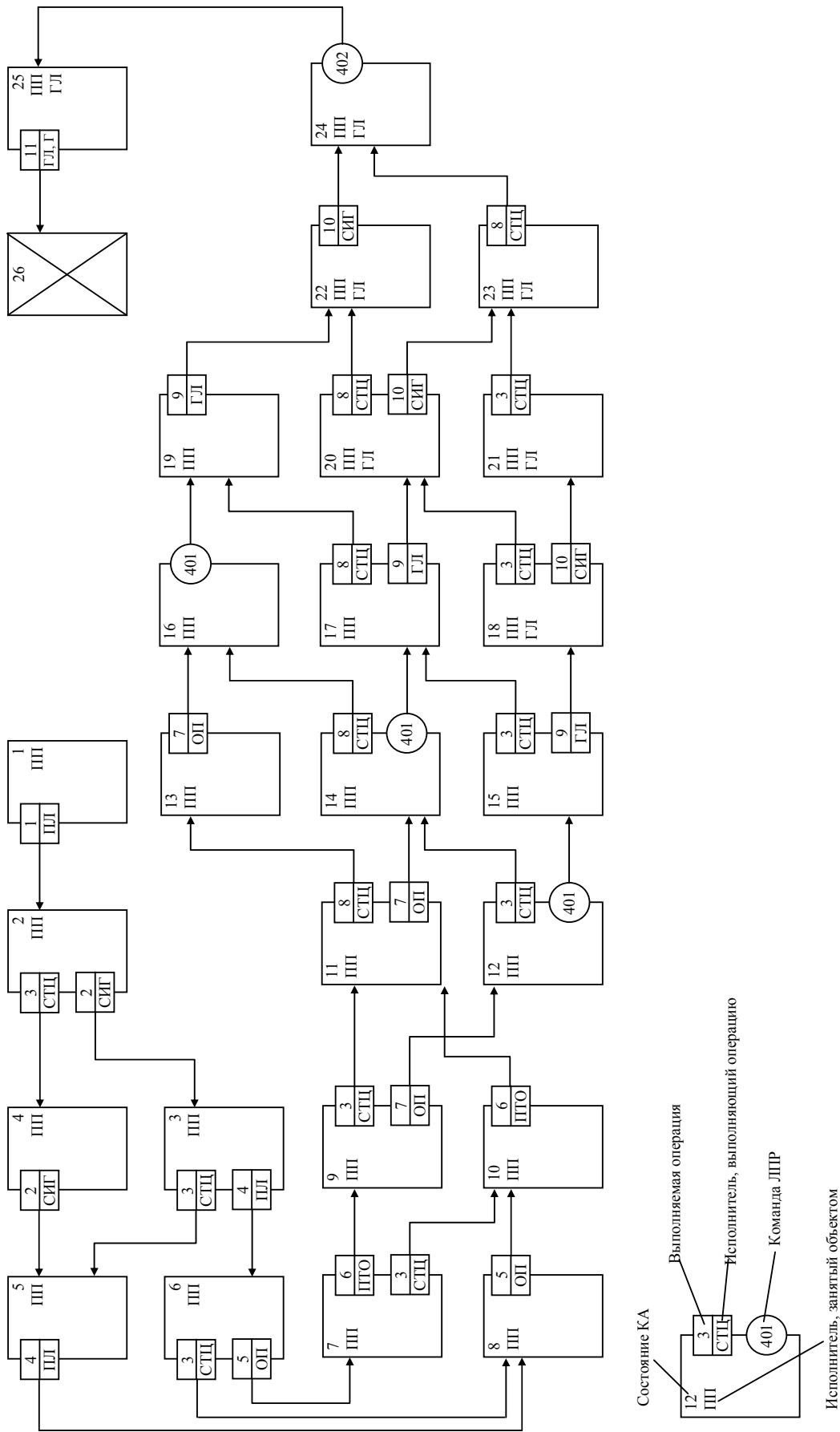


Рис. 2.14. Граф переходов КА для моделирования технологического процесса обслуживания расформируемого состава, полученный с использованием средств автоматизированного построения

Данный оргграф является взвешенным; при этом каждому состоянию КА ставятся в соответствие списки идентификаторов выполняемых операций, занятых и/или выполняющих операцию исполнителей и возможных команд от ЛВМ. Исполнители на рисунке обозначены следующим образом: путь приема – ПП, горочный локомотив – ГЛ, сигналист – СИГ, оператор ПТО – ОП, бригада ПТКО – ПТО, сортировочная горка – Г. В каждой вершине оргграфа указаны: номер соответствующего состояния КА, идентификаторы исполнителей, занятых обслуживанием объекта, номера выполняемых операций и идентификаторы исполнителей этих операций, а также возможные команды ЛВМ.

Разработанная методика позволяет моделировать ТП станций любого уровня сложности и с любой степенью детализации. При этом использование КА допускает моделирование различных вариантов обслуживания объектов, что обеспечивает существенную гибкость модели. Кроме того, формализация ТП в виде КА делает возможным интерактивное участие человека в процессе моделирования работы станции, что является обязательным при создании эргатических моделей.

2.4.6. Моделирование перемещений подвижного состава по станции

Перемещение поездов и маневровых составов является одним из основных элементов технологического процесса работы станции. Поэтому в ФМС осуществляется имитационное моделирование перемещений объектов, которое позволяет адекватно имитировать занятие элементов путевого развития станции и блок-участков на подходах к ней, а также получать достоверную оценку времени движения объектов при возникновении задержек из-за враждебности маршрутов.

Перемещение объектов по путям станции, оборудованной системой ЭЦ или МРЦ, осуществляется по сигналам, переключение которых происходит в результате взаимодействия движущегося подвижного состава с рельсовыми цепями. Поэтому при моделировании перемещения объектов корректируется модель занятия путевых участков подвижным составом (см. п. 2.2.3), в результате чего модель

системы управления перемещениями (см. п. 2.3) осуществляет соответствующее переключение светофоров.

Одним из наиболее распространенных и эффективных средств моделирования процесса перемещения железнодорожного подвижного состава является метод, основанный на выполнении тяговых расчетов с использованием дифференциального уравнения движения, в котором в качестве независимой переменной выбрано время [72]. Однако указанный метод требует выполнения достаточно громоздких вычислений, а также наличия в модели дополнительных данных для тяговых расчетов (план и продольный профиль путей станции и подходов к ней, технические характеристики локомотивов). Поэтому включение подобного модуля в ФМС существенно усложняет построение эргатической модели станции.

Следует также отметить, что при выполнении исследований с помощью эргатического моделирования работы станций высокая точность определения времени движения поездов и маневровых составов не требуется; как показал анализ, в данном случае достаточным является расчет времени движения с точностью до минуты. В этой связи для имитации продолжительности занятия отдельных элементов станции и определения возможных задержек подвижного состава в ФМС использован метод моделирования перемещений поездов, локомотивов и маневровых составов, основанный на предположении об их равноускоренном (равнозамедленном) движении по маршруту. При этом скорости движения выбираются с учетом показаний светофоров и снижаются до допустимой величины при подъезде локомотивов к стоящим вагонам. При таком подходе скорость может возрастать до максимально допустимой для данной категории объектов величины и поддерживается на этом уровне до точки начала торможения. Указанная точка устанавливается так, чтобы при торможении объект мог уменьшить скорость до нужной величины при проследовании сигналов, требующих снижения скорости, либо остановиться при подъезде к стоящим вагонам или другим препятствиям.

Начало движения всех объектов на станции осуществляется в соответствии с командами ЛВМ. В этой связи следует различать объекты, не имеющие разрешения на движение, и объекты, остановившиеся у закрытых светофоров и ожидающие их открытия. С этой целью в подмножестве технических параметров \mathbf{P}^R в модели объекта Q_j (2.8) предусматривается параметр ψ , характеризующий его состоя-

ние и направление движения ($\psi = 0$ – объект стоит, $\psi = 1$ – объект движется вправо, $\psi = -1$ – объект движется влево). При таком подходе временно остановившийся объект будет иметь скорость $V_j = 0$ и параметр $\psi \neq 0$. При моделировании перемещения объектов рассматриваются только те из них, у которых $\psi \neq 0$.

Каждый движущийся объект в текущий момент времени перемещается по некоторому маршруту, конечной точкой которого является светофор попутного направления с определенным сигнальным показанием σ , стоящие на пути вагоны либо конец пути (тупик). Для маневровых составов конечной точкой маршрута также может быть маневровый сигнал встречного направления, за который должен проследовать последний вагон состава. Расстояние до конца маршрута L_m определяется на каждом шаге перемещения по данным модели путевого развития.

Принято, что по маршруту объект движется с постоянным ускорением $a_p > 0$ (разгон), либо $a_t < 0$ (торможение); ускорение выбирается в начале каждого шага перемещения объекта в зависимости от его скорости V_j , расстояния до конца маршрута L_m и от показания светофора σ . При этом первоначально выбор ускорения a осуществляется только в зависимости от соотношения фактической скорости объекта V_j и максимально допустимой скорости его движения по маршруту V_{max} (если $V_j \leq V_{max}$, то $a = a_p$, иначе – $a = a_t$). Численные значения a_p , a_t выбираются из модели движущегося объекта O_j (2.8); они могут устанавливаться при настройке ФМС в зависимости от местных условий.

Моделирование перемещения объекта на шаге Δt осуществляется с помощью выражений:

$$V_{j+1} = V_j + a\Delta t, \quad \Delta S_j = V_j\Delta t + \frac{a\Delta t^2}{2}, \quad \Delta S_j \geq 0,$$

где V_{j+1} – скорость объекта в конце шага;

ΔS_j – расстояние перемещения объекта на шаге.

Если величина V_{j+1} превысит допустимую скорость объекта $V_{кт}$ в конечной точке маршрута, то осуществляется проверка возможно-

сти ее снижения на оставшемся участке маршрута до величины $V_{\text{кт}}$ (поиск точки начала торможения). С этой целью вычисляется необходимая длина тормозного пути:

$$l_{\text{т}} = \frac{V_{\text{кт}}^2 - V_{j+1}^2}{2a_{\text{т}}}, \quad a_{\text{т}} < 0.$$

Скорость $V_{\text{кт}}$ устанавливается равной допустимой скорости $V(\sigma)$ проследования светофоров с сигнальным показанием σ ; если же концом маршрута является некоторое препятствие (вагоны, упор тупика), то принимается $V_{\text{кт}} = 0$.

Если расстояние $l_{\text{т}}$ превысит длину оставшейся части маршрута после данного шага ($l_{\text{т}} > L_{\text{м}} - \Delta S_j$), то начало шага рассматривается как точка начала торможения. В этой связи на данном шаге устанавливается ускорение $a = a_{\text{т}}$ и осуществляется повторный расчет параметров перемещения объекта V_{j+1} и ΔS_j . Перемещение ΔS_j используется для корректирования текущего положения объекта в модели занятия путей в конце шага Δt .

Если объект приближается к препятствию ($\sigma = 3$) либо к светофору с запрещающим показанием ($\sigma = 2$), то в этом случае переход головы объекта через границу участка пути запрещается. Практически в этом случае уменьшается величина перемещения ΔS_j так, чтобы в конце шага $\Delta S_{j+1} = 0$.

Разработанная методика не требует большого объема вычислений и вместе с тем позволяет с достаточной точностью моделировать перемещение поездов и маневровых составов на станции и на ее подходах с учетом разгона и торможения.

2.5. Информационная модель станции

При эргатическом моделировании железнодорожных станций ЛВМ принимает непосредственное участие в управлении работой станции, выполняя функции диспетчера. Вместе с тем для ускорения

процесса моделирования основную его часть выполняет ЭВМ в автоматическом режиме. Однако при возникновении конфликтных ситуаций, требующих принятия управленческих решений (выбор пути приема поезда, выбор очередности обслуживания составов, выбор локомотива и т. д.), эти действия возлагаются на ЛВМ. В этой связи ФМС должна в интерактивном режиме обеспечить ЛВМ возможность контроля текущей ситуации, принятия решений и передачи управляющих команд. С этой целью в состав ФМС введена информационная модель, которая используется ЛВМ для реализации указанных функций.

Информационная модель (ИМ) включает совокупность данных, необходимых ЛВМ для контроля и управления объектами в модели станции. ИМ является источником информации, на основе которой ЛВМ формирует образ текущей ситуации в модели, производит анализ возникшей ситуации, вырабатывает управляющие решения и контролирует состояние всей системы (станции или отдельного парка). В процессе моделирования ЛВМ взаимодействует только с информационной моделью и всю необходимую информацию по управлению станцией получает также из ИМ. Поэтому качество построения информационной модели является одним из решающих факторов, определяющих эффективность функционирования всей ФМС.

Как показал анализ, ИМ наиболее целесообразно разрабатывать в виде мнемосхемы станции (парка) с управляющими элементами на основе реального рабочего места ДСП, который непосредственно управляет работой данной станции. Для примера, на рис. 2.15 приведена схема парка приема одной из крупных сортировочных станций Украины, а на рис. 2.16 – информационная модель данного парка, представленная в виде мнемосхемы парка и набора элементов визуального контроля и управления [78, 82].

Схема станции (парка) изображается в ИМ в виде отдельных линий *l* (см. рис. 2.16), каждая из которых представляет собой отдельный участок пути. С целью визуального контроля занятости изолированных стрелочных и путевых секций, линии могут быть трех цветов: красный – секция занята подвижным составом, желтый – секция заперта в маршруте, черный – секция свободна. Цвет линии определяется текущим состоянием соответствующей изолированной секции в МСУП (2.5). Каждый участок пути (линия) в ИМ представляется структурой

$$D_k = \{N_k, x_1, y_1, x_2, y_2, w_k\}, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

- где N_k – идентификатор изолированной секции в МСУП (2.5);
 x_1, y_1 – экранные координаты начала линии;
 x_2, y_2 – экранные координаты конца линии;
 w_k – ширина линии в пикселях;
 n – число линий на схеме станции (парка).

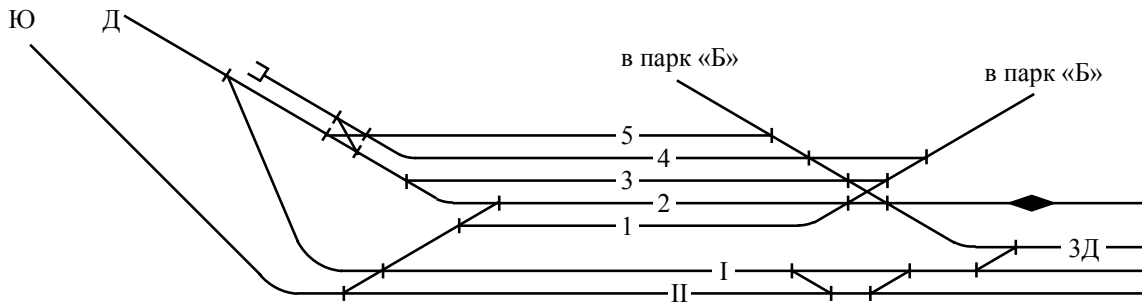


Рис. 2.15. Схема парка приема сортировочной станции

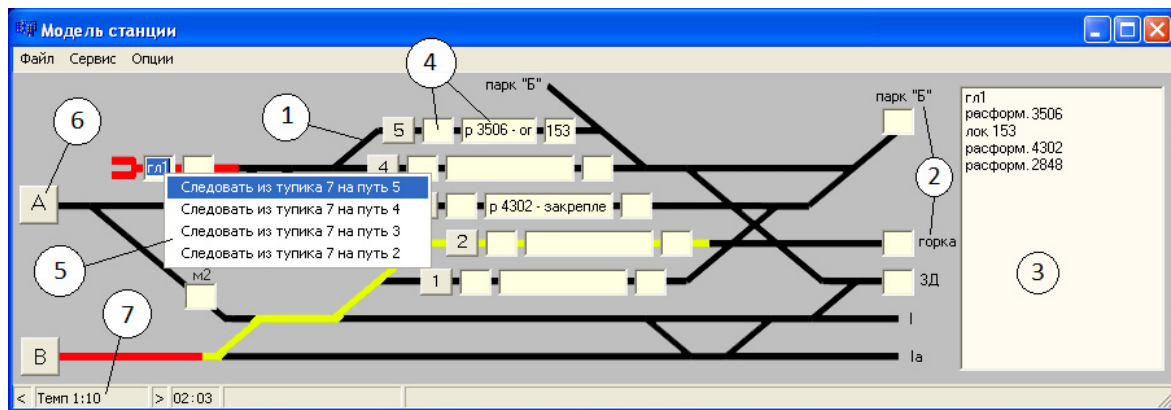


Рис. 2.16. Информационная модель приема сортировочной станции

Для вывода в ИМ надписей или изображений используются специализированные метки 2 (см. рис. 2.16).

Для учета объектов подвижного состава (поездов, локомотивов, групп вагонов), находящихся в парке и на подходах к нему, в ИМ включен динамически изменяющийся список 3 (см. рис. 2.16), в котором отображаются тип и номера указанных объектов. Окно списка объектов представляется структурой

$$L = \{x_3, y_3, x_4, y_4, L_{obj}\},$$

где x_3, y_3, x_4, y_4 – координаты соответственно верхнего левого и нижнего правого углов окна;

L_{obj} – список названий объектов и их идентификаторов.

Для отображения состояния путевых участков, на которых могут находиться стоящие локомотивы или группы вагонов, в ИМ предусмотрены информационные поля 4 (см. рис. 2.16), в которых указываются номера локомотивов или идентификаторы групп вагонов. Каждое такое информационное поле в ИМ представляется структурой

$$Q = \{N_Q, x_5, y_5, w_q, I_{obj}, T_{obj}\},$$

где N_Q – идентификатор информационного поля;

x_5, y_5 – координаты верхнего левого угла поля;

w_q – ширина информационного поля;

I_{obj} – идентификатор объекта, данные которого отображаются в поле;

T_{obj} – текст, который отображается в поле.

Управление объектами подвижного состава осуществляется с помощью контекстных меню команд 5 (см. рис. 2.16). В этих меню приводится список команд, которые может выполнить объект в текущий момент времени. Контекстные меню активизируются при выборе полей 4 (см. рис. 2.16) только в тех случаях, когда объекты находятся на соответствующих путевых участках в ожидании выполнения определенных действий. Контекстное меню в ИМ представляется структурой

$$M = \{L_C, S_C, I_{obj}\},$$

где L_C – динамически обновляемый список команд, доступных для объекта в текущий момент времени;

S_C – список сигналов, которые посылаются в ФМС (для КА данного объекта) при выборе определенной команды.

Для приготовления маршрутов перемещения объектов по станции в ИМ предусмотрены кнопки 6 (см. рис. 2.16), при нажатии которых

в МСУП посылаются команды, инициирующие проверку и реализацию заданного маршрута. При этом воздействие на моторные элементы ИМ осуществляется с помощью манипулятора «мышь». Каждый такой моторный элемент (кнопка) представляется структурой

$$B = \{N_B, x_6, y_6, x_7, y_7, C_B, F_B\},$$

- где N_B – идентификатор кнопки, соответствующий сигналу в МСУП (2.4);
- x_6, y_6, x_7, y_7 – координаты соответственно верхнего левого и нижнего правого углов моторного элемента (кнопки);
- C_B – название кнопки (текст, который отображается на кнопке);
- F_B – команда, которая посылается в МСУП при нажатии на кнопку.

Во время работы с эргатической моделью можно изменять темп моделирования. Для этого в ИМ предусмотрена панель управления скоростью изменения системного времени 7 (см. рис. 2.16), с помощью которой ее можно варьировать в широких пределах. ФМС автоматически переходит в режим реального времени в случае возникновения конфликтной ситуации, для разрешения которой необходима команда ЛВМ. После принятия решения и ввода команды ЛВМ может вновь увеличить темп моделирования до необходимой величины. Такая организация работы модели позволяет значительно ускорить процесс моделирования и в то же время обеспечивает ЛВМ необходимым запасом времени для принятия решений. Эксперименты с моделью показали, что при таком подходе для эргатического моделирования суточной работы станции необходимо около 10–15 минут.

2.6. Модель системы «горка–сортировочный парк»

Как отмечалось, при эргатическом функциональном моделировании ЛВМ непосредственно управляет работой станции, принимая оперативные решения в соответствии со сложившейся ситуацией.

При моделировании работы сортировочных комплексов у ЛВМ возникает необходимость принимать решения, связанные с планированием расформирования составов на сортировочной горке. В этом случае ФМС посредством ИМ должна обеспечивать ЛВМ информацией, необходимой для принятия решений об очередности расформирования составов. К такой информации относятся данные о текущем состоянии путей сортировочного парка, а также данные о составе расформируемых поездов (количество вагонов, их тип, масса, назначение). Кроме того, в этом случае необходимо моделировать как процесс накопления вагонов на путях сортировочного парка, так и процесс роспуска составов на горке.

2.6.1. Модель сортировочного парка

Модель содержит данные о текущем состоянии путей сортировочного парка и предназначена для моделирования их заполнения при роспуске составов, а также перемещения отдельных вагонов при выполнении маневровой работы между роспусками (осаживание вагонов, подтягивание, повторная сортировка, уборка накопленных составов и др.).

Модель сортировочного парка представляется списком структур \mathbf{H}_i , характеризующим состояние всех его путей

$$\mathbf{H}_i = \left\{ \mu, q_{\text{бр}}, L_{\text{пол}}, L_{\text{св}}, n_{\text{п}}, Q_{\text{п}}, L_{\text{ок}}, \mathbf{G} \right\}, \quad i = 1, \dots, M, \quad (2.14)$$

- где μ – номер сортировочного пути;
 $q_{\text{бр}}$ – средняя масса брутто одного вагона на пути;
 $L_{\text{пол}}$ – полезная длина пути;
 $L_{\text{св}}$ – длина свободной части пути со стороны горки;
 $n_{\text{п}}$ – общее число вагонов, находящихся на пути;
 $Q_{\text{п}}$ – масса брутто группы вагонов с назначением, соответствующим назначению пути;
 $L_{\text{ок}}$ – суммарная длина окон между вагонами;
 \mathbf{G} – список групп вагонов, находящихся на пути;
 M – число путей в сортировочном парке.

Из перечисленных параметров в списке структур \mathbf{H}_i только номер пути μ и его полезная длина $L_{\text{пол}}$ и средняя масса брутто вагона $q_{\text{бр}}$ должны быть указаны во входной информации о сортировочном парке; остальные данные формируются автоматически в процессе моделирования. Длина свободной части каждого сортировочного пути $L_{\text{св}}$ определяется перед началом моделирования как случайная величина, распределенная по закону Эрланга с параметром k [93]. Тогда случайное значение $L_{\text{св}}$ может быть определено как

$$L_{\text{св}} = -\frac{M[L_{\text{св}}]}{k} \ln \prod_{j=1}^k R_j. \quad (2.15)$$

Математическое ожидание $M[L_{\text{св}}]$ длины свободной части сортировочного пути перед роспуском состава можно определить по статистическим данным наблюдений за работой горки. Приблизительно величину $M[L_{\text{св}}]$ можно установить по вероятности $P_{\text{св}}$ того, что сортировочный путь перед роспуском состава окажется свободным. Очевидно, что указанную вероятность можно представить как

$$P_{\text{св}} = 1 - P(L_{\text{св}} < L_{\text{пол}}),$$

где $P(L_{\text{св}} < L_{\text{пол}}) = F(L_{\text{пол}}) = 1 - e^{-\frac{2L_{\text{пол}}}{M[L_{\text{св}}]}} \left(1 + \frac{2L_{\text{пол}}}{M[L_{\text{св}}]} \right)$.

Вероятность $P_{\text{св}}$ приближенно можно определить как

$$P_{\text{св}} = \bar{m}_{\text{гр}} / m_{\text{с}},$$

где $\bar{m}_{\text{гр}}$ – средняя величина группы вагонов, поступающих на путь в результате роспуска;

$m_{\text{с}}$ – величина накапливаемого состава вагонов.

Тогда из приведенных выражений получим трансцендентное уравнение

$$P_{\text{св}} = e^{-\frac{2L_{\text{пол}}}{M[L_{\text{св}}]}} \left(1 + \frac{2L_{\text{пол}}}{M[L_{\text{св}}]} \right),$$

решая которое можно установить искомое значение $M[L_{\text{св}}]$. На рис. 2.17 приведена зависимость $P_{\text{св}} = f(A)$, $A = \frac{2L_{\text{пол}}}{M[L_{\text{св}}]}$, позволяющая установить величину $M[L_{\text{св}}]$ при заданном значении вероятности $P_{\text{св}}$. Для удобства использования указанную зависимость целесообразно представить приближенным выражением вида $A = f(P_{\text{св}})$:

$$A = 0,8928 - 1,3585 \ln P_{\text{св}} - 0,0244 (\ln P_{\text{св}})^2. \quad (2.16)$$

Как показали исследования [94], вероятность $P_{\text{св}} = 0,027$; при таком значении $P_{\text{св}}$ величина A , вычисленная с помощью (2.16), составляет $A = 5,481$. Тогда величина математического ожидания длины свободной части пути при $L_{\text{пол}} = 850$ м составляет $M[L_{\text{св}}] = 310$ м, что близко к приведенному в [93] значению 340 м.

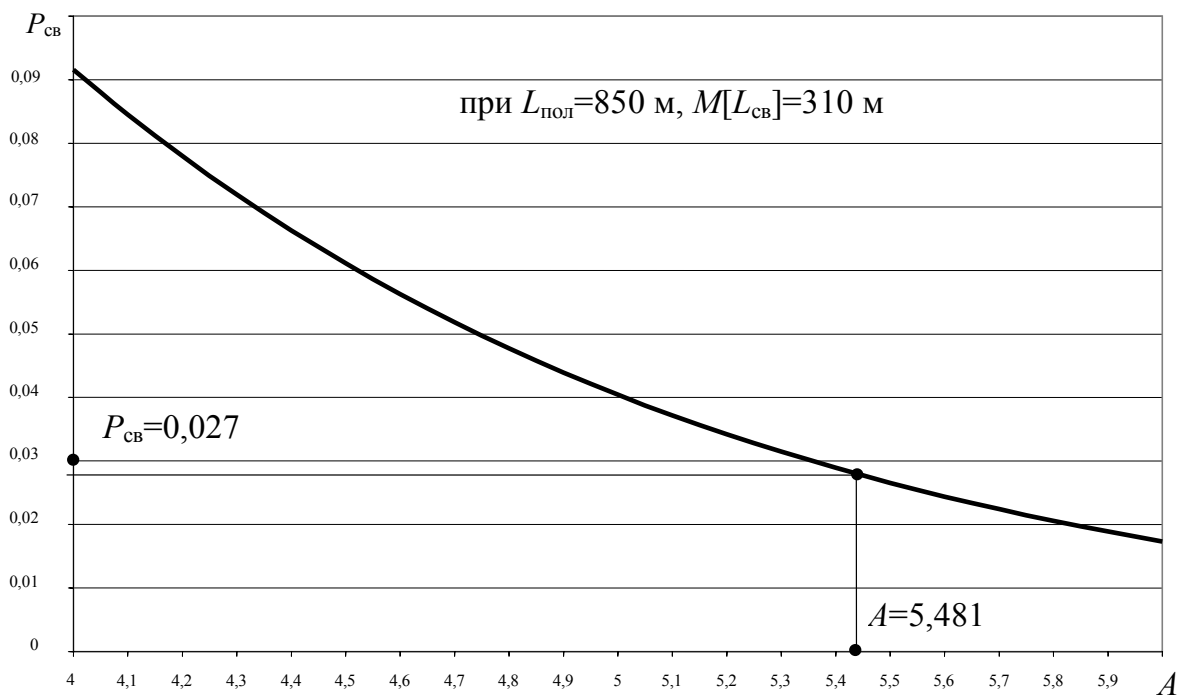


Рис. 2.17. Вероятность следования отцепы на свободный путь

При моделировании длины свободной части пути с помощью (2.15) полученное значение $L_{\text{св}}$ ограничивается величиной полезной длины $L_{\text{пол}}$ соответствующего пути (при $L_{\text{св}} > L_{\text{пол}}$ принимается

$L_{\text{св}} = L_{\text{пол}}$, что означает свободу данного пути перед роспуском очередного состава).

Число вагонов $n_{\text{п}}$ в (2.14) перед началом моделирования должно соответствовать длине части пути, занятой вагонами ($L_{\text{пол}} - L_{\text{св}}$), и учитывать наличие определенного числа и длины окон между вагонами. В этой связи число вагонов $n_{\text{п}}$ определяется как

$$n_{\text{п}} = \frac{L_{\text{пол}} - L_{\text{св}}}{l_{\text{ваг}} + \lambda},$$

где $l_{\text{ваг}}$ – средняя длина вагона;

λ – средняя длина окна, приходящаяся на один переработанный вагон.

Величина λ после ликвидации части окон вследствие проталкивания в соответствии с исследованиями [94, 95] составляет 3...3,5 м.

Приведенные данные позволяют также найти суммарную длину окон $L_{\text{св}}$ в группе стоящих на пути вагонов $L_{\text{св}} = n_{\text{п}} \lambda$.

Масса брутто группы вагонов $Q_{\text{п}}$ определяется по их числу $Q_{\text{п}} = n_{\text{п}} q_{\text{бр}}$.

Список групп вагонов \mathbf{G} на данном пути необходим для учета вагонов, назначение которых не соответствует специализации этого пути

$$\mathbf{G} = \{\mu_j, \nu_j, Q_{\text{п}j}\}, \quad j = 1, \dots, N_{\text{гр}},$$

где μ_j – номер пути назначения вагонов группы;

ν_j – количество вагонов одного назначения, расположенных на пути одной группой;

$Q_{\text{п}j}$ – масса брутто вагонов группы;

$N_{\text{гр}}$ – число групп вагонов на пути.

Группы вагонов разного назначения на одном пути могут появляться в результате неразделений на стрелках некоторых отцепов при роспуске составов. Кроме того, группы вагонов других назначений могут быть направлены на путь временно при совмещении процесса расформирования с формированием новых составов. При этом при-

нято, что в начальный период моделирования на каждом пути находятся вагоны только одного назначения ($N_{гр} = 1$).

Изложенная методика определения параметров модели (2.14) $L_{св}$, $n_{п}$, $Q_{п}$, $L_{ок}$, \mathbf{G} используется только при ее формировании в начале моделирования; в дальнейшем указанные параметры корректируются после расформирования каждого состава, а также после выполнения маневровой работы с вагонами на путях сортировочного парка при формировании составов и их перестановке в парк отправления.

2.6.2. Модель планирования расформирования составов

Данная модель предназначена для подготовки информации о составе, необходимой ЛВМ для принятия решения о его расформировании в текущий момент времени. Модель представляется в виде списка структур \mathbf{D}_k , характеризующих отдельные группы вагонов расформируемого состава:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D}_k &= \{H_{гр}, n_{гр}, Q_{гр}, n^+, n_{п}, Q_{п}, z, \theta\}, \\ k &= 1, \dots, N_{наз}, \end{aligned} \right\}, \quad (2.17)$$

где $H_{гр}$ – номер пути назначения группы;

$n_{гр}$ – число вагонов в группе;

$Q_{гр}$ – масса брутто вагонов группы;

n^+ – текущая вместимость пути назначения;

z – признак замыкающей группы;

θ – признак, характеризующий возможность размещения данной группы на свободной части пути назначения ($\theta = 0$);

$N_{наз}$ – число назначений вагонов состава.

Данные для указанной модели формируются на основе модели состава, планируемого ЛВМ к расформированию, с учетом текущего состояния путей сортировочного парка (см. п. 2.6.1). Для каждого пути назначения $H_{гр}$ вагонов состава определяется их общее число $n_{п}$ и масса брутто $Q_{п}$. Далее из модели состояния сортировочного парка

(2.14) по номеру пути $\mu = H_{\text{гр}}$ выбираются текущие данные о состоянии этого пути и определяются необходимые параметры модели \mathbf{D}_k . При этом число вагонов n^+ , которое может уместиться на пути, определяется как

$$n^+ = \left\lfloor \frac{L_{\text{св}}}{L_{\text{ваг}}} \right\rfloor.$$

Данные о суммарном числе $n_{\text{п}}$ и массе брутто $Q_{\text{п}}$ вагонов данного назначения, находящихся на пути $H_{\text{гр}}$, определяются без учета вагонов других назначений, которые могут временно находиться на данном пути. Перечисленная информация позволяет установить факт завершения процесса накопления вагонов на данном пути по массе ($z=1$), по длине состава ($z=2$) либо по обоим признакам ($z=3$); в противном случае принимается $z=0$.

Значение параметра θ устанавливается путем сравнения текущей вместимости сортировочного пути (2.17) с длиной группы вагонов данного назначения. Если группа не уместается на пути ($n_{\text{гр}} > n^+$), то $\theta=1$; в таком случае данная группа вагонов не может быть направлена на путь назначения до освобождения пути (или его части).

Данные рассмотренной модели (2.17) формируются и отображаются в ИМ в момент выбора ЛВМ соответствующего состава для организации его расформирования.

2.6.3. Моделирование технологических операций в сортировочном парке

Основными технологическими операциями, в результате которых изменяется заполнение путей сортировочного парка, являются роспуск составов, осаживание вагонов на сортировочных путях, повторная сортировка групп вагонов, подтягивание вагонов со сторны хвостовой части сортировочного парка, а также уборка накопленных составов в парк отправления. При моделировании указанных операций необходимо определить потребное время занятия маневровых локомотивов, а также выполнить корректирование состояния путей сортировочного парка после выполнения этих операций.

Время роспуска состава с горки определяется как [96]

$$t_{\text{росп}} = \frac{0,06 \cdot l_{\text{ваг}} \cdot m_c}{v_{\text{росп}}} \left(1 - \frac{1}{2g_0} \right),$$

где m_c – количество вагонов в составе;

$v_{\text{росп}}$ – средняя скорость роспуска состава;

g_0 – количество отцепов в составе.

При роспуске составов возможны неразделения отцепов на стрелках, в результате которых они направляются на пути, не соответствующие их назначению. В этой связи для каждого отцепа моделируется возможное изменение маршрута следования как случайное событие с заданной вероятностью P_n (вероятность неразделения). При этом, если указанное событие имеет место, то для данного отцепа моделируется номер стрелки, на которой произошло неразделение, и соответствующий новый путь назначения. Номер стрелки неразделения моделируется как одно из случайных событий, образующих полную группу; при этом должны быть заданы вероятности неразделения отцепов на всех стрелочных позициях.

Для моделирования образования окон между вагонами на сортировочных путях используется следующая методика. По результатам экспериментальных исследований ряда горок [94, 95] вероятность преждевременной остановки отцепа составляет $P_0 = 0,14 \dots 0,16$. Поэтому образование окна при скатывании очередного отцепа можно рассматривать как случайное событие с указанной вероятностью. При этом случайная величина окна по данным тех же исследований имеет экспоненциальное распределение с математическим ожиданием $M[L_0] = 92$ м; при этом случайное значение величины окна можно моделировать как

$$L_{oi} = -M[L_0] \ln r_i, \quad L_{oi} \leq L_{\text{св}} - l_{\text{отц}},$$

где r_i – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$.

Случайная длина окна ограничивается так, чтобы отцеп мог разместиться в пределах свободной части сортировочного пути $L_{\text{св}}$.

После определения случайной величины окна корректируется текущая вместимость соответствующего пути: $L_{\text{св}} = L_{\text{св}} - (l_{\text{отц}} + L_o)$.

После роспуска всего состава в модели сортировочного парка корректируется распределение вагонов по путям и длины свободной части путей. Анализ данных о состоянии путей сортировочного парка, а также об очередном расформируемом составе позволяет ЛВМ принимать решения о необходимости осаживания вагонов, особенно на тех путях, на которых не может разместиться группа вагонов из этого состава. При подаче ЛВМ команды на осаживание вагонов на некотором пути необходимо выполнить моделирование этой операции, определив ее общее время, и изменить соответствующим образом длину свободной части данного пути. Время осаживания $t_{\text{ос}}$ вагонов можно определить как сумму продолжительностей $\sum t_{oi}$ полурейсов ликвидации отдельных окон на данном пути с учетом времени заезда t_3 на путь о вершины горки и выезда с него t_b после завершения осаживания: $t_{\text{ос}} = t_3 + \sum t_{oi} + t_b$.

С целью упрощения модели продолжительность отдельного полурейса t при маневрах по осаживанию и перестановке вагонов в сортировочном парке можно определять в соответствии с [96]; при этом длина полурейса определяется по плану станции с учетом длины группы вагонов, величина которой принимается по данным модели соответствующего пути (см. п. 2.6.1). По истечении рассчитанного времени $t_{\text{ос}}$ соответствующий маневровый локомотив вновь появляется на вершине горки и может быть использован ЛВМ для дальнейшей работы в парке.

Продолжительность операций, которые выполняются в хвостовой части сортировочного парка (подтягивание вагонов и уборка накопленного состава), также может быть определена в соответствии с [96]. Для указанных операций необходимо определить момент их завершения, после чего выполнить соответствующую корректировку модели сортировочного парка (см. п. 2.6.1). Следует учесть, что подтягивание вагонов осуществляется по запросу ЛВМ, а уборка состава – по завершению его накопления. При этом момент начала соответствующих операций зависит от ситуации в подсистеме формирования и при независимом моделировании сортировочного комплекса может рассматриваться как случайный. Поэтому момент $t_{\text{осв}}$ завершения

указанных операций и освобождения сортировочных путей определяются как

$$t_{\text{осв}} = t_{\text{и}} + \tau,$$

где $t_{\text{и}}$ – момент инициализации операций по освобождению пути: для уборки состава – после окончания накопления, для подтягивания – после команды ЛВМ;

τ – случайное время выполнения операции с учетом ожидания ее начала.

После выполнения указанных операций на определенном сортировочном пути корректируется модель сортировочного парка для этого пути: изменяется список вагонов, находящихся на пути (после уборки состава), а также определяется новое значение параметра $L_{\text{св}}$.

2.7. Генератор входящего потока поездов

Генератор входящего потока ФМС (см. рис. 2.1) предназначен для моделирования моментов поступления поездов на станцию, а также параметров этих поездов (категория, состав, назначение, тип, масса вагонов и др.). Входящий поток представляется последовательностью моментов поступления в систему заявок различных категорий. В систему поступает K в общем случае неоднородных потоков поездов ($K \geq 1$). По каждой линии в систему могут поступать поезда различных категорий (грузовые, пассажирские и др.) с параметрами (вес, длина, скорость и др.), представляющими собой случайные величины с заданными законами распределения. Momentами поступления поездов в систему считаются моменты их появления на входных блоках участков линий, примыкающих к станции. Интервалы поступления поездов также рассматриваются как случайные величины.

Параметры потоков прибывающих поездов оказывают существенное влияние на функционирование станций, и поэтому в модели осуществляется статистическое моделирование входящих потоков поездов.

Каждый поезд, который поступает в систему, характеризуется рядом параметров (2.8). Поток поездов, поступающий в систему по

каждой линии, может быть представлен последовательностью моментов появления поездов T_{vxi} и их категорий v_i (2.8). Учитывая случайный характер потоков поездов, интервал между ними Δt_i рассматривается как случайная величина с некоторым законом распределения, а категория поезда – как случайное событие. Для моделирования случайных потоков поездов для каждой входящей линии должны быть заданы размеры движения и закон распределения случайной величины интервала между поездами.

Как известно, в большинстве случаев, интервалы между поездами Δt представляют случайную величину, распределенную по усеченному закону Эрланга ($\Delta t \geq \Delta t_{\min}$) с параметром K [26, 27, 66], и моделируются с помощью выражения

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\min} - M[\Delta t]}{K} \ln \prod_{j=1}^k R_j + \Delta t_{\min} .$$

При других законах распределения для моделирования Δt используются соответствующие этим законам выражения [66].

Математическое ожидание интервала поступления поездов по каждой линии рассчитывается по заданным среднесуточным размерам потока:

$$M[I] = 1440 / \sum_{i=1}^n N_i ,$$

где N_i – среднесуточное число поездов i -й категории на данной линии;

n – количество категорий поездов.

Параметры $M[\Delta t]$, K и Δt_{\min} задаются на этапе идентификации модели.

В момент появления поезда на входном блок-участке линии моделируются его начальная V_0 и максимально допустимая $V_{\text{доп}}$ скорости. Начальная скорость V_0 для каждого поезда моделируется как случайная величина, распределенная по нормальному закону

$$V_0 = M[V_0] + Z_i \sigma[V_0],$$

где Z_i – случайная величина, распределенная по нормальному закону с параметрами $M[Z] = 0$, $\sigma[Z] = 1$.

Параметры распределения скорости $M[V_0]$, $\sigma[V_0]$, а также значение $V_{\text{доп}}$ выбираются в зависимости от показания светофора в голове данного блок-участка. Если начальным блок-участком является станционный путь, с которого поезд отправляется, то принимается $V_0 = 0$.

Категория поезда v_i (грузовой, пассажирский) и направление его следования (номер исходящей линии) моделируются как случайные события; вероятности указанных событий рассчитываются по заданным среднесуточным размерам соответствующих потоков N_i .

К технологическим параметрам поезда \mathbf{P}^T (2.8) относятся данные о его составе (количество вагонов и параметры каждого вагона). Количество вагонов m_i в составе каждого поезда моделируется как дискретная случайная величина, закон распределения которой задан статистическим рядом $\{m_j, P_j\}$, $\sum P_j = 1$. Указанный ряд может быть получен на основе статистической обработки натуральных листов прибывающих поездов (см. п. 4.3).

Список вагонов \mathbf{M} состава представляется как

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_m\},$$

где \mathbf{v}_i – вектор параметров, которые характеризуют вагон

$$\mathbf{v}_i = \{s, f, q, l\},$$

где s – назначение вагона;

f – тип вагона;

q, l – соответственно масса брутто и условная длина вагона.

Тип f каждого вагона моделируется как случайное событие из полной группы событий, которые представляют собой все возможные типы вагонов. При этом используются данные о частоте появления в составе поезда вагонов каждого типа (см. п. 4.3).

Масса брутто q каждого вагона определяется как сумма массы груза в вагоне $q_{\text{гр}}$ и массы его тары $q_{\text{т}}$. При моделировании массы груза вначале определяется уровень загрузки вагона (порожний, с заданным уровнем загрузки или полногрузный). Вероятности

появления вагонов каждой категории загрузки получают по данным статистической обработки натуральных листов прибывающих поездов (см. п. 4.3).

Масса груза $q_{гр}$ для груженого вагона моделируется как равномерно распределенная случайная величина в интервале, соответствующем установленному для этого вагона диапазону массы; для полногрузного вагона масса груза принимается равной грузоподъемности вагона.

Масса тары q_t и условная длина l вагона определяются в зависимости от его типа. При этом используется нормативно-справочная информация, хранящаяся в специальном файле данных моделирующей программы.

Моделирование назначений вагонов состава осуществляется с использованием методики, приведенной в [73]. Для этого используется матрица условных вероятностей следования вагонов состава на отдельные назначения $\|p_{ij}\|_{(m+1) \times m}$. Каждый элемент такой матрицы p_{ij} представляет собой условную вероятность следования вагона на j -й путь сортировочного парка, определенную при условии, что предыдущий вагон направляется на i -й путь. Матрица $\|p_{ij}\|$ может быть получена на основе статистической обработки размеченных телеграмм-натуральных листов (ТГНЛ) расформируемых составов. В полученных в результате моделирования составах случайное количество вагонов в отцепе имеет геометрическое распределение, которое отвечает характеру потока отцепов на горках. Кроме того, в составах сохраняются связи между назначениями соседних отцепов. Назначение j каждого следующего вагона моделируется как случайное событие из полной группы событий, вероятности которых указаны в i -й строке матрицы $\|p_{ij}\|$. Строка i матрицы выбирается в соответствии с назначением предыдущего вагона (при моделировании назначения первого вагона выбирается первая строка).

Параметры для моделирования входящего потока поездов определяются на этапе идентификации ФМС и заносятся в базу данных ГВП. Кроме того, на основе полученных с помощью ГВП входящих потоков поездов могут формироваться сценарии, которые в дальнейшем используются при выполнении серий экспериментов с ФМС.

2.8. Моделирование работы станции с использованием эргатической модели

Имитационное моделирование станций выполняется в целях исследования и получения технико-экономической оценки различных реконструктивных и организационных мероприятий, направленных на совершенствование технического оснащения и технологии работы станций. Для этого после построения модели с ней выполняется серия экспериментов при различных исходных значениях технико-технологических параметров (конструкции путевого развития станции, ее технического оснащения и технологии работы). Разработанная ФМС позволяет по результатам моделирования установить значение технико-эксплуатационных показателей, которые в дальнейшем используются для анализа работы станции и технико-экономической оценки возможных вариантов ее совершенствования.

Входящий поток поездов формируется с помощью соответствующего генератора (см. п. 2.7) или же может быть задан в виде заранее сформированного сценария – файла данных специальной структуры. Для создания таких сценариев авторами разработан специальный редактор (рис. 2.18). При этом каждый сценарий соответствует одному из возможных вариантов организации работы станции, эффективность и целесообразность реализации которого необходимо оценить. На основе полученных наборов сценариев формируется база исходных условий ФМС.

В процессе исследования выполняется несколько серий экспериментов с эргатической моделью станции; при этом каждой серии экспериментов соответствует определенный сценарий из базы ГВП. Продолжительность периода моделирования в каждом эксперименте определяется задачами конкретного исследования.

В процессе моделирования ЛВМ с помощью визуальных и моторных элементов информационной модели (см. п. 2.5) контролирует текущую ситуацию и управляет работой моделируемой станции, выполняя функции диспетчера. При этом значительная часть технологических операций, выполнение которых не требует вмешательства ЛВМ, моделируется с максимальным ускорением системного времени, а в режим реального времени модель переходит только в случае возникновения конфликтной ситуации, для разрешения которой необходима команда ЛВМ.

Тренажер ДСП / Підхід поїздів

Загальні відомості | Перегін Нижньодніпровськ-НДВ | Перегін Дн. Південний-НДВ | Місцева робота

№ поїзда: 2202 | Відправлення: 03:15 | Тип поїзда: розборка | № локомотива: 192 | Індекс поїзда: 4200 08 4500 | Умова довжина ЗФ після розформування: 55

Додати | Видалити | Очистити

Закрити | Записати | Записати все | Тренажер

0:01	2110 розб з Нижн лок 166 інд 4200 10 4500 УДЛ 50
0:04	112 пасс з Нижн
0:28	2112 тран з Нижн на Ясиновату
0:57	2114 тран з Нижн на Джанкой
1:28	2116 розб з Нижн лок 203 інд 4100 12 4500 УДЛ 50
1:35	3310 розб з Нижн лок 103 інд 4501 01 4500 УДЛ 50
1:40	6118 прим з Нижн
2:06	2120 тран з Нижн на Дебальцево
2:49	2122 розб з Нижн лок 180 інд 4100 14 4500 УДЛ 50
3:00	2124 тран з Нижн на Кр. Лиман

Рис. 2.18. Окно редактора сценариев

Моделирование позволяет получить необходимые технико-эксплуатационные показатели работы станции, которая проектируется или реконструируется. С этой целью в модели фиксируются моменты начала и окончания каждой технологической операции с каждым объектом (поездом, локомотивом, составом), которые в дальнейшем используются для определения простоев в ожидании обслуживания объектов и задержек отдельных передвижений подвижного состава. Анализ данных о простоях в ожидании обслуживания позволяет рассмотреть варианты усиления соответствующих обслуживающих устройств, а также увеличения числа путей и развития горловин станции в случае существенных простоев в ожидании передвижений.

В процессе моделирования фиксируется также продолжительность занятия основных технических средств станции (путей, путевых и стрелочных секций), а также всех обслуживающих устройств (маневровых локомотивов, бригад ПТО и ПКО, сигналистов и др.). Эти данные используются для расчетов загрузки элементов станции и последующего анализа соответствия конструкции станции и технологии ее работы заданным объемам работы. Статистическая обработка указанных данных, полученных с помощью модели на множестве реализаций процесса функционирования станции (серии экспериментов), позволяет установить средние значения необходимых технико-эксплуатационных показателей, соответствующих определенным исходным условиям (сценарию моделирования).

При работе ФМС моменты наступления определенных (заданных) событий (момент прибытия поезда, моменты начала и окончания технологических операций и т.д.) записываются в протокол. С этой целью в МТП предусмотрены соответствующие команды, которые выполняются при наступлении определенных событий. Каждая информационная строка протокола имеет следующую структуру:

$$S_p = \{N_e, T_e, E_s\},$$

где N_e – код события;

T_e – момент наступления события в минутах;

E_s – строка комментария события.

В строке E_s указывается идентификатор объекта в целях разделения одинаковых событий для разных объектов.

По результатам моделирования, записанным в протоколе, фрагмент которого приведен на рис. 2.19, определяются продолительно-

сти простоя составов в системе, а также задержки выполнения отдельных операций. При этом для автоматизации обработки протоколов авторами разработана специальная компьютерная программа, главное окно которой представлено на рис. 2.20.

```

1   5   : готов к отправлению поезд из Д № 2856
504 8   : поезд № 2856 прибыл в парк
3   12  : закреплен поезд № 2856
4   14  : отцеплен поездной локомотив у состава № 2856
5   14  : огражден состав № 2856
20  51  : обработаны документы состава № 2856
6   53  : закончен техосмотр состава № 2856
10  53  : снято ограждение у состав № 2856
7   54  : к составу № 2856 прицеплен маневровый локомотив
8   57  : убраны башмаки из-под состава № 2856
35  58  : отрекорректированы документы состава № 2856
558 58  : начат надвиг на горку состава № 2856
1   60  : готов к отправлению поезд из Д № 2632
504 63  : поезд № 2632 прибыл в парк
3   67  : закреплен поезд № 2632
4   68  : отцеплен поездной локомотив у состава № 2632
5   68  : огражден состав № 2632
9   82  : закончен отпуск состава № 2856

```

Рис. 2.19. Фрагмент протокола результатов моделирования

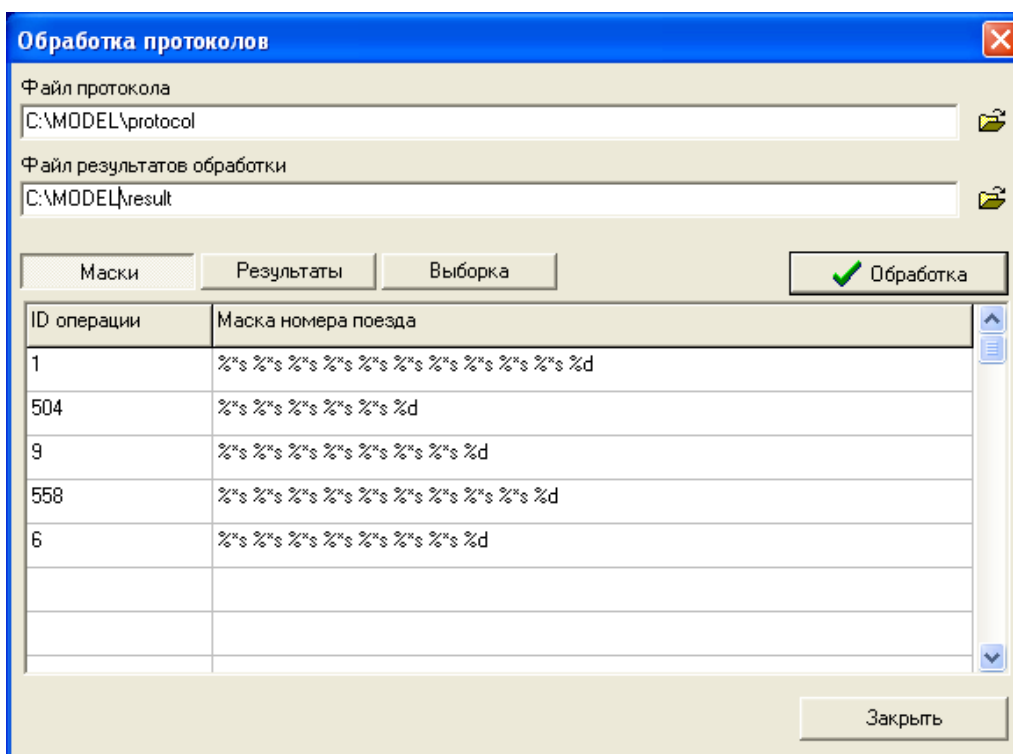


Рис. 2.20. Интерфейс программы обработки протоколов

Данная программа по коду события N_e формирует списки однотипных событий и определяет различия моментов наступления заданных ЛВМ событий для каждого объекта согласно его идентификатора. Полученные данные хранятся в файле, фрагмент которого приведен на рис. 2.21. В этом файле приведены результаты расчетов общего времени простоя поездов в парке приема, продолжительности задержек поездов и задержек выполнения отдельных технологических операций.

Простой поезда № 2856 в парке	- 74,00 мин.
Простой поезда № 2632 в парке	- 64,00 мин.
.	
Простой поезда № 3510 в парке	- 83,00 мин.
min	= 62,00
max	= 156,00
среднее	= 78,36
Задержка по не приему поезда № 2856	- 0,00 мин.
Задержка по не приему поезда № 2632	- 3,00 мин.
.	
Задержка по не приему поезда № 3510	- 15,00 мин.
min	= 3,00
max	= 15,00
среднее	= 3,70
Обработка документов поезда № 2856	- 43,00 мин.
Обработка документов поезда № 2632	- 47,00 мин.
.	
Обработка документов поезда № 3510	- 39,00 мин.
min	= 39,00
max	= 52,00
среднее	= 43,57
.	

Рис. 2.21. Фрагмент файла с результатами обработки протоколов моделирования

Полученные данные о простоях и продолжительностях выполнения отдельных операций приводятся к среднесуточным значениям с помощью выражения

$$t_{\text{cp}} = \frac{24}{T_{\text{мод}}} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где $T_{\text{мод}}$ – период моделирования;

t_i – значение показателя i -го объекта;

n – количество объектов, которые обслужены за период $T_{\text{мод}}$.

На основе данных о фактической продолжительности выполнения технологических операций определяется загрузка отдельных исполнителей, а также технических средств станции (путевого развития, локомотивов, сортировочной горки, грузовых фронтов и т. д.).

Кроме того, оценить эффективность функционирования станции при определенных условиях работы (сценарии) можно на основе анализа графика исполненного движения (ГИД), который автоматически ведется в процессе моделирования и по его окончании может быть выведен на печать (рис. 2.22). На графике отображаются моменты прибытия и отправления поездов, занятие стрелочных и путевых секций всеми видами перемещений подвижного состава, а также занятие отдельных путей с выделением времени обслуживания и его ожидания.

Полученные в результате эргатического моделирования показатели функционирования станции в дальнейшем используются для выполнения технико-экономических расчетов по оценке эффективности тех или иных проектных мероприятий.

2.9. Регенеративный метод функционального моделирования железнодорожных станций

При моделировании систем случайной природы важно, чтобы полученные результаты обрабатывались с помощью убедительного статистического анализа. В частности, необходимы такие методы оценивания, которые позволяют пользователю по результатам моделирования формулировать обоснованные статистические заключения о свойствах модели. Эти методы необходимы также и для того, чтобы была возможность определить важную взаимосвязь между временем моделирования и уровнем точности оценок. Однако до недавнего времени набор статистических процедур, используемых для анализа результатов моделирования стохастических систем, был существенно ограничен.

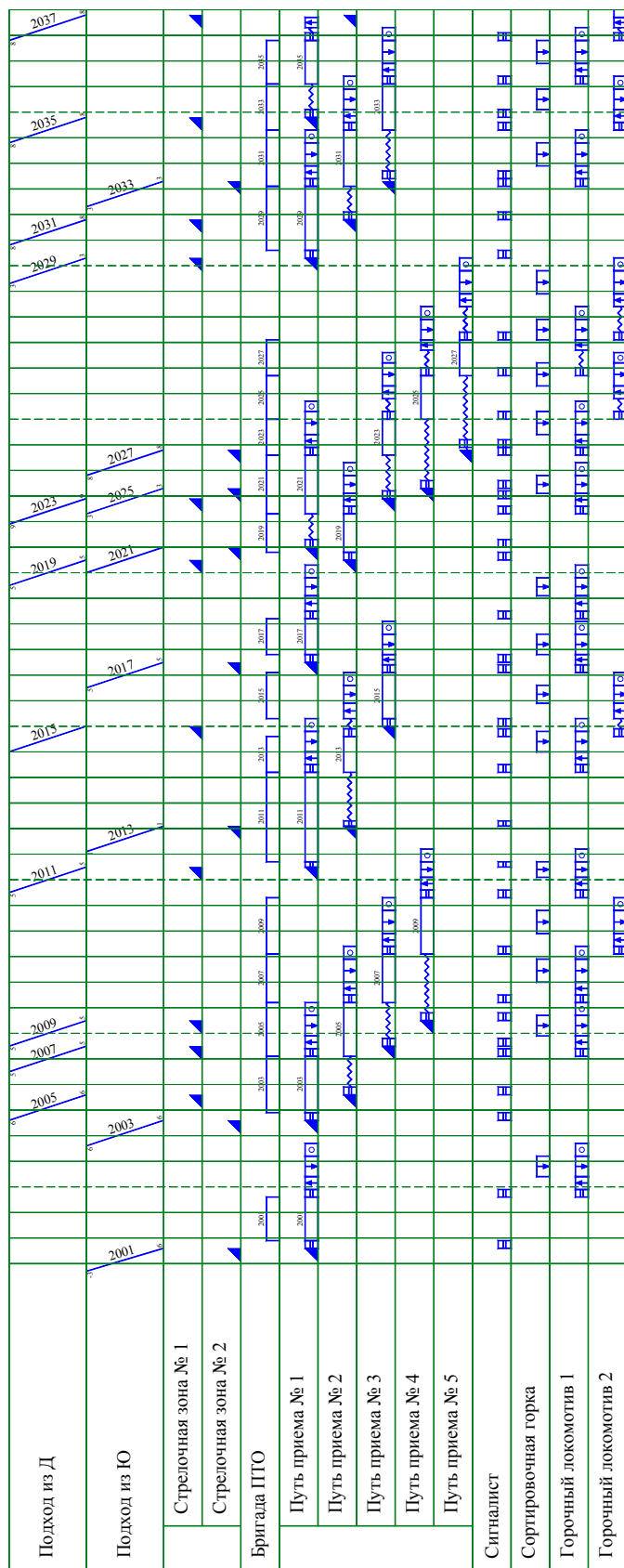


Рис. 2.22. График исполненного движения, построенный по результатам моделирования

Поэтому выполнение адекватного статистического анализа, как правило, оказывается слишком сложным, а при его упрощении зачастую фактически игнорируются такие важные факторы, как достоверные уровни и точность оценок. В стремлении преодолеть эти проблемы недавно был разработан новый метод анализа, известный как регенеративный метод [97–99].

При моделировании работы системы массового обслуживания (станции) по обработке заявок (поездов) определяется некоторый критерий эффективности ее функционирования $E\{W\}$. Выборочное среднее значение величины W рассчитывается как

$$W = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_N}{N}, \quad (2.18)$$

где N – количество заявок, которые обслужены в системе.

Известно, что выборочное среднее W стремится к истинному значению $E\{W\}$ с вероятностью 1 при $N \rightarrow \infty$. Такой подход нуждается в выполнении значительных объемов моделирования (повторения экспериментов с моделью). При эргатическом моделировании продолжительность выполнения одного эксперимента существенно больше по сравнению с моделями, функционирующими в автоматическом режиме. В этой связи возникает задача минимизации количества необходимых экспериментов с эргатической моделью при обеспечении достаточной точности (достоверности) результатов, полученных по итогам моделирования.

Следует также отметить, что выборочное значение W в силу начальных условий моделирования является смещенной оценкой для истинного значения $E\{W\}$, поскольку в начале моделирования, как правило, в системе нет ни одной заявки. Для решения указанных проблем и определения достоверного значения критерия $E\{W\}$ при минимально допустимом объеме экспериментов с эргатической моделью целесообразно использование метода регенеративного анализа, суть которого состоит в следующем.

Набор данных W_1, W_2, \dots, W_N значительно коррелируют между собой [97, 99], поэтому их разбивают на k циклов, то есть (Y_k, α_k) , где Y_k – сумма значений W_i в k -м цикле, α_k – количество обслуженных в k -м цикле заявок.

Каждый цикл k начинается при одинаковых условиях моделирования (например, в системе нет ни одной заявки) и система в эти моменты «восстанавливается» (регенерирует). Таким образом, будут получены k независимых распределений. На рис. 2.23, для примера, приведен фрагмент графика, построенного по результатам моделирования процесса обслуживания заявок в некоторой системе за определенный период времени T . Полученная выборка результатов моделирования разбита на 3 цикла, причем каждый цикл начинается в тот момент, когда в системе нет ни одной заявки.

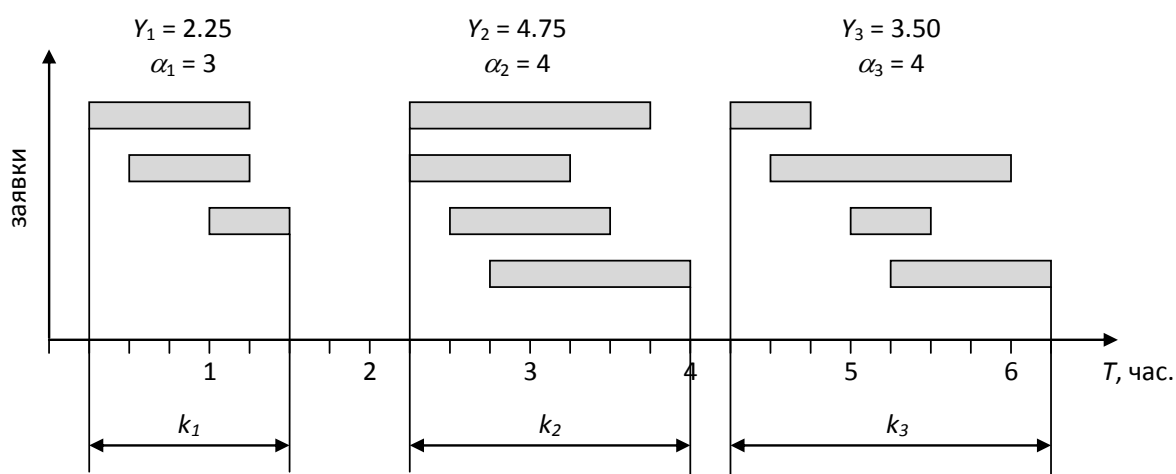


Рис. 2.23. Формирование циклов регенерации системы

Таким образом, если N – общее число заявок, которые обслужены в n циклах, то

$$\frac{W_1 + W_2 + \dots + W_N}{N} = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n},$$

Правую часть данного выражения можно записать в виде

$$\frac{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)/n}{(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)/n}. \quad (2.19)$$

Так как каждый из наборов $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ и $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ составляется из независимых и одинаково распределенных случайных величин, то в силу закона больших чисел с вероятностью 1 числитель

в (2.19) при $n \rightarrow \infty$ стремится к значению $E\{Y_1\}$, а знаменатель – к $E\{\alpha_1\}$. Необходимо отметить, что $N \geq n$ и $N \rightarrow \infty$ при $n \rightarrow \infty$, так как $E\{W\} = E\{Y_1\}/E\{\alpha_1\}$.

Таким образом, задача оценки $E\{W\}$ сводится к задаче оценки отношения $E\{Y_1\}/E\{\alpha_1\}$. При этом данное отношение оценивается по независимым и одинаково распределенным парам $(Y_1, \alpha_1), \dots, (Y_n, \alpha_n)$ с помощью построения доверительного интервала

$$I = \frac{\bar{Y}}{\bar{\alpha}} \pm \frac{\Phi^{-1}\left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \cdot \sqrt{D_{Y,\alpha}}}{\bar{\alpha}\sqrt{k}},$$

где $\bar{Y}, \bar{\alpha}$ – соответственно средние значения параметров Y_k и α_k ;

Φ^{-1} – функция стандартизованного нормального распределения;

δ – параметр, который зависит от установленного уровня надежности ξ в процентах и составляет $\delta = 1 - 0,01\xi$;

$D_{Y,\alpha}$ – выборочная дисперсия значений Y_k и α_k ;

k – количество циклов регенерации.

Оценка эффективности метода регенеративного анализа была выполнена с использованием разработанной авторами имитационной модели железнодорожной станции, которая функционирует в автоматическом режиме. В данной модели железнодорожная станция рассматривается как СМО, а технологический процесс ее работы формализован методами сетевого планирования и управления [68]. Такая модель позволяет адекватно выполнять моделирование работы станций с детализацией по отдельным технологическим операциям и не требует вмешательства ЛВМ.

С помощью указанной имитационной модели проведен ряд экспериментов без использования регенеративного метода. При этом варьировались входящий поток требований λ (заявок/ч) и количество обслуженных заявок N , а в качестве критерия эффективности функционирования системы (2.18) был принят показатель t – продолжительность нахождения заявки в СМО, который определялся по результатам каждого эксперимента.

Аналогичная серия экспериментов с указанной моделью была выполнена с использованием регенеративного метода. При этом после каждого цикла регенерации осуществлялся расчет критерия эффективности (показателя t^*); в случае достижения заданного уровня соответствия между значением показателя t^* и значением показателя t , полученного по результатам моделирования без использования регенеративного метода для тех же исходных данных, процесс моделирования прекращался. После каждого такого эксперимента фиксировалось количество обслуженных заявок N^* [100].

Анализ результатов выполненного исследования показал, что в зависимости от установленного уровня надежности, период моделирования при регенеративном методе сокращается по сравнению с традиционным подходом на 20...40 %, обеспечивая при этом необходимую точность результатов моделирования. Таким образом, использование регенеративного метода при функциональном эргатическом моделировании станций является целесообразным. В этой связи в состав ФМС включен модуль управления (МУ), который во время моделирования работы станции получает от МТП данные, необходимые для расчетов показателей ее работы. Этот модуль предназначен для предварительных расчетов результатов функционирования станции с учетом методов регенеративного анализа и выдачи ЛВМ рекомендаций относительно возможности прекращения процесса моделирования. Эксперименты с моделью показали, что при заданной надежности результатов моделирования на уровне 95 % использование регенеративного метода позволяет сократить продолжительность работы эргатической модели на 30 %.

2.10. Моделирование работы железнодорожных станций на основе построения суточного плана-графика

Традиционно для анализа технического оснащения и технологии работы железнодорожных станций, условий их взаимодействия с подъездными путями используется графическая модель в виде суточного плана-графика (см. рис. 2.22). Такая модель наиболее полно отвечает противоречивым требованиям, которые выдвигаются при

решении научно-практических задач, связанных с исследованием и усовершенствованием работы железнодорожных станций: с одной стороны, обеспечивается большая информативность модели, с другой – простота ее построения и анализа. Суточный план-график имеет значительную информационную емкость и обеспечивает высокую скорость поиска и доступа к необходимой информации. Поэтому, несмотря на относительную простоту графической модели, она широко используется практически с самого начала функционирования железных дорог и по настоящее время. Вместе с тем графическая модель имеет определенные недостатки, среди которых наиболее существенными являются: неучет случайного характера продолжительности выполнения технологических операций; упрощение построения графика, в результате чего на нем отображается лишь часть технологических операций и исполнителей; низкая скорость построения суточных планов-графиков, которая значительно уменьшает количество рассматриваемых конкурирующих вариантов технико-технологических решений.

Для преодоления указанных проблем наиболее эффективно выполнять разработку планов-графиков с использованием ЭВМ. В настоящее время с этой целью обычно используются универсальные графические редакторы, например AutoCAD, CorelDraw и др. Такой подход позволяет получать планы-графики в виде графических файлов и решает проблемы, связанные с их тиражированием и архивированием. В то же время методика построения плана-графика по существу сохраняется, что не дает возможности ускорить разработку технологии работы станций, увеличить число рассматриваемых вариантов и в результате повысить качество принимаемых решений.

Указанные недостатки могут быть устранены в случае автоматизированного построения графических моделей работы железнодорожных станций (планов-графиков) с использованием методов имитационного моделирования. В этой связи в ДИИТе разработан моделирующий комплекс, который объединяет в себе преимущества имитационной и графической моделей [101]. При этом использована технология эргатического моделирования станций, которая предусматривает возможность непосредственного участия оператора в процессе моделирования с выполнением функций диспетчера станции. Построение чертежа плана-графика выполняется автоматически или в интерактивном режиме с помощью средств компьютерной

графики. Структура моделирующего комплекса в этом случае несколько упрощается за счет исключения модулей МПР и МСУП (рис. 2.24).

Информационная модель при этом представляется не в виде мнемосхемы станции (см. рис. 2.16), а в виде суточного плана-графика работы станции на временной сетке. Она предназначена для предоставления ЛВМ информации о текущем состоянии технологического процесса, а также для восприятия от него управляющих команд и передачи их в МТП. В памяти ЭВМ суточный план-график представляется структурой

$$I = \{E, G, S, t_m\},$$

где **E** – множество строк суточного графика; при этом строки, которые имеют общие характеристики, могут быть объединены в группы **G**;

S – множество графических примитивов, соответствующих технологическим операциям, которые выполнены с объектами;

t_m – заданный момент окончания моделирования.

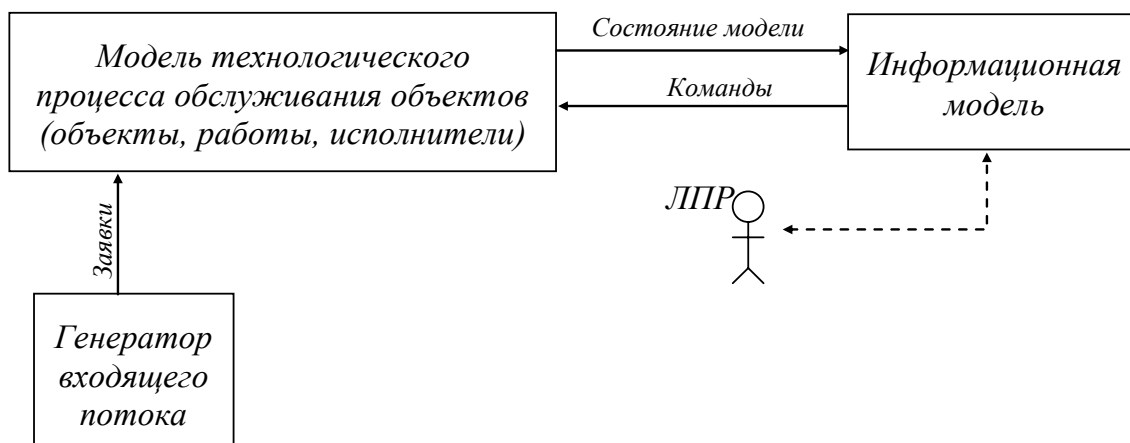


Рис. 2.24. Структура моделирующего комплекса для автоматизированного построения плана-графика работы станции

Для автоматизированного построения сетки суточного плана-графика разработан специальный редактор (рис. 2.25).

Моделирование работы станции может выполняться как автоматически, когда порядок обслуживания устанавливается согласно заданной системе приоритетов, так и в интерактивном режиме, когда этот порядок определяет ЛВМ. Управление процессом моделирова-

ния выполняется ЛВМ с помощью специальных элементов управления: команд меню, кнопок, полей задач исполнителей и линии границы времени моделирования. Внешний вид информационного поля моделирующего комплекса представлен на рис. 2.26.

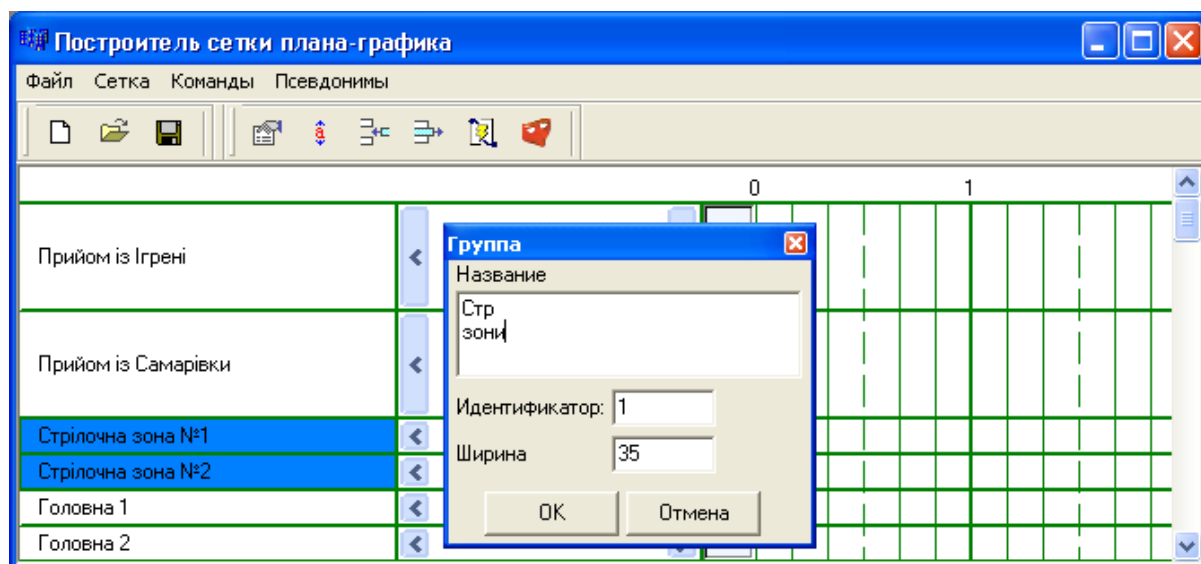


Рис. 2.25. Окно редактора для построения сетки плана-графика

Все программные модули разработанного комплекса поддерживают единый формат представления сетки и условных обозначений плана-графика, что позволяет вносить в него необходимые изменения с помощью любого модуля. Моделирующий комплекс дает возможность в автоматизированном режиме готовить исходную информацию о станциях, функционирование которых исследуется, в интерактивном режиме строить суточные планы-графики для разных условий работы этих станций, обеспечивает расчеты показателей работы станций и формирование соответствующих графических файлов для анализа графиков и их архивирования. Отличительной особенностью разработанных программных модулей является возможность сохранения полученного плана-графика в форматах, которые поддерживаются графическими пакетами AutoCAD и CorelDraw.

Использование данного программного комплекса позволяет существенно повысить производительность труда инженерных работников, целесообразно его применение при разработке технологических процессов железнодорожных станций, а также при технико-экономическом анализе эффективности мероприятий по усовершенствованию их технического обеспечения и технологии работы [102].

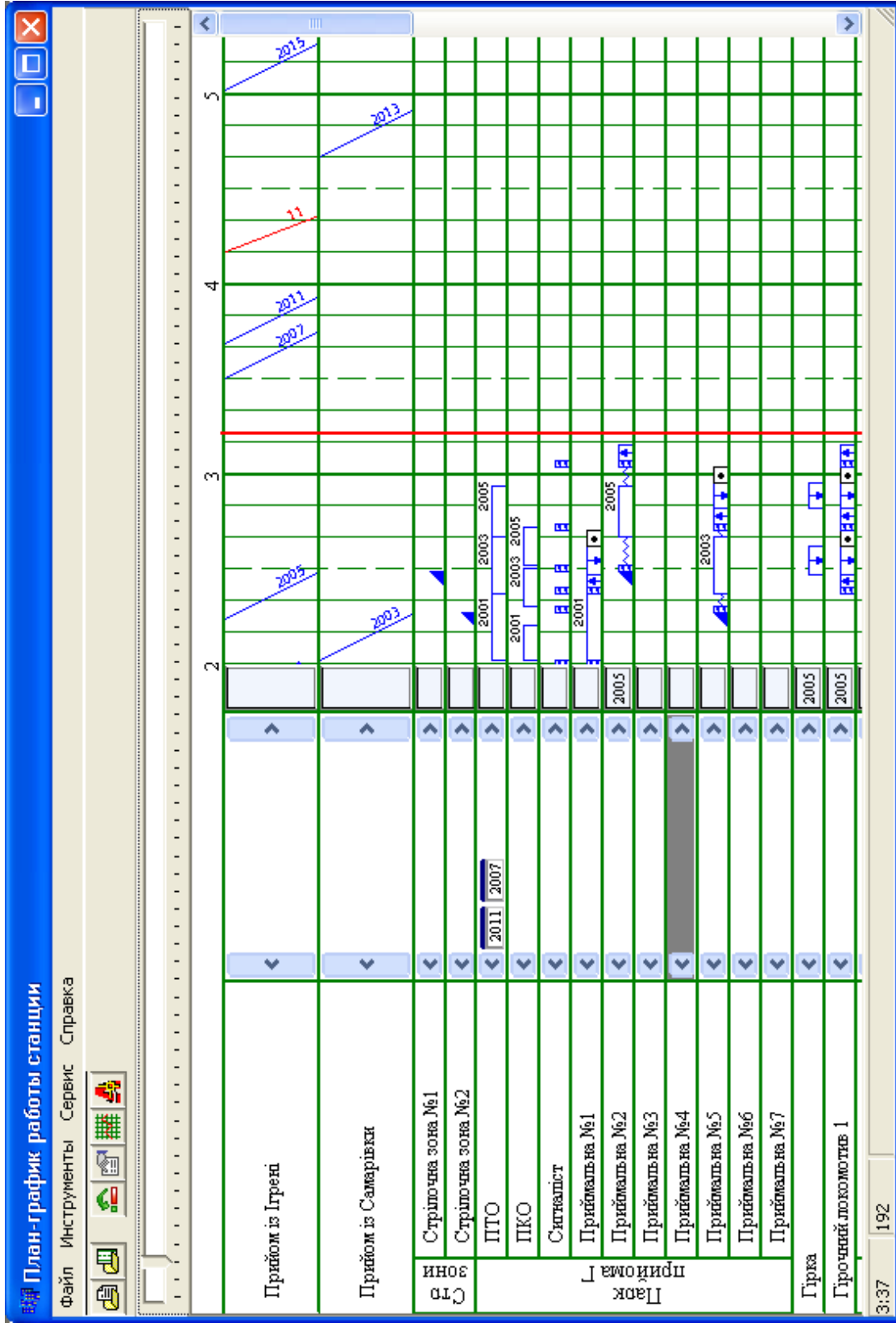


Рис. 2.26. Имитационная модель станции в процессе работы

Автоматизированное формирование функциональных моделей железнодорожных станций

3.1. Проблемы разработки функциональных моделей станций

В предыдущем разделе изложена методика построения функциональных эргатических моделей железнодорожных станций, которые предусматривают возможность непосредственного участия человека в процессе моделирования для контроля и управления работой моделируемой станции. Каждая такая модель имеет сложную структуру и включает целый ряд модулей, обеспечивающих ее функционирование (см. рис. 2.1).

Опыт создания подобных моделей для конкретных станций показал, что данная задача является весьма сложной и трудоемкой. Прежде всего, это связано со сложностями формализации технологических процессов работы, которые на каждой станции зачастую имеют множество отличительных особенностей. Кроме того, существует необходимость формализации технического оснащения железнодорожных станций – путевого развития и системы станционной автоматики. В результате формализации технология работы станции и ее техническое оснащение представляются в виде файлов данных специальной структуры, которые являются исходной базой для построения ФМС.

Для унификации и ускорения процесса построения эргатических функциональных моделей для конкретных объектов авторами были разработаны специальные редакторы, которые позволяют в автоматизированном режиме получить необходимые файлы данных с формализованной информацией о технико-технологических параметрах той или иной станции. При этом исходные файлы данных для модели путевого развития (см. п. 2.2) и модели управления перемещениями

подвижного состава (см. п. 2.3) получают на основе преобразования геометрических моделей путевого развития железнодорожных станций, которые содержат данные о топологии путевого развития станций, длинах путевых и стрелочных участков, типах стрелочных переводов и светофоров, расположении светофоров, предельных столбиков, изолирующих стыков и др. Указанные модели строят с помощью средств автоматизированного проектирования железнодорожных станций [90]. Полученные таким образом файлы дополняются при построении МПР и МСУП данными, необходимыми для функционирования модели (ограничения скорости движения, технологические функции путевых участков, коды команд для ФМС при занятии и освобождении путевых участков и изолированных секций и др.).

Кроме того, разработан также специальный графический редактор, позволяющий в автоматизированном режиме строить информационные модели для ФМС различных станций (см. п. 2.5), в т. ч. для компьютерных тренажеров подготовки диспетчерского персонала станций (см. гл. 6).

3.2. Построение модели технологического процесса на основе объектно-ориентированной платформы

3.2.1. Основные элементы объектно-ориентированной модели технологического процесса

Основной проблемой, которая возникает при построении ФМС для конкретных станций, является сложность формализации технологических процессов их работы, так как они могут иметь существенные различия для разных объектов. Для решения этой проблемы авторами была разработана методика формализации технологии работы железнодорожных станций на основе детерминированных конечных автоматов (см. п. 2.4). Вместе с тем построение для каждой станции подобных автоматов, которые бы адекватно описывали реальные процессы обслуживания различных объектов, представляет собой весьма сложную и трудоемкую задачу. Это объясняется как

значительной сложностью реальных технологических процессов, так и существенным их различием для разных станций. В этой связи авторами на основе объектно-ориентированной платформы была разработана методика автоматизированного построения подобных КА, а также специальные программно-инструментальные средства (специализированный редактор) для реализации этой методики [103]. Следует отметить, что данная методика является универсальной и применима для формализации технологических процессов любой сложности при построении функциональных моделей железнодорожных станций любых типов.

При моделировании станция или ее отдельный технологический комплекс рассматривается как управляемая многофазная многоканальная система массового обслуживания (п. 2.4). В указанной системе входящий поток образуют объекты, требующие обслуживания на станции (поезда, составы, локомотивы). Фазами обслуживания являются отдельные технологические операции (закрепление состава, технический осмотр и др.), которые выполняются в определенной последовательности в соответствии с технологическим процессом. Продолжительности операций технологического процесса могут принимать постоянные значения или моделируются как случайные величины, параметры которых зависят от характеристик объекта. Обслуживающими устройствами являются исполнители технологических операций (маневровые локомотивы, сортировочные горки, бригады ПТО и др.).

Объектно-ориентированный подход требует разработки четкой структуры модели с выделением всех ее структурных элементов и определением взаимосвязей между ними. Основными элементами технологического процесса работы станции являются: обрабатываемые объекты (составы, локомотивы), работы (технологические операции, в т. ч. связанные с передвижением подвижного состава), исполнители (как работники, так и отдельные технические средства). Для реализации МТП на объектно-ориентированной платформе в ее структуру введен еще один элемент – функции.

В качестве объектов рассматриваются локомотивы и составы. Каждый объект Q_j представляется в модели с помощью структуры (2.8). Свойства объектов в памяти ЭВМ хранятся в виде ассоциативного списка, каждый элемент которого описывается структурой (ключ-1 . данные-1, ключ-2 . данные-2, ..., ключ- N . данные- N). Ключ

представляет собой целое число и определяет тип конкретного параметра объекта (идентификатор объекта, тип объекта, текущее состояние, назначение, масса, число вагонов и др.). Данные соответствуют ключу и либо задаются в начале моделирования (формируются при разработке сценария), либо корректируются в процессе работы модели.

С каждым объектом на станции выполняются определенные технологические операции (работы), которые предусмотрены технологическим процессом (закрепление, технический и коммерческий осмотр и др.). В разработанной модели каждая технологическая операция W_i представляется структурой (2.10). Каждой операции технологического процесса работы станции поставлен в соответствие уникальный идентификатор и набор параметров, часть из которых постоянна (тип работы, исполнитель, условия ее выполнения, правила моделирования ее продолжительности и др.), а часть динамически изменяется в процессе моделирования (моменты начала и окончания работы, текущий обслуживаемый объект, текущий исполнитель работы, текущее состояние работы). При описании технологического процесса различаются глобальные работы, которые могут выполняться с любыми объектами, и внутренние работы объектов, которые выполняются только с тем объектом, которому они принадлежат.

Выполнение технологических операций на станции обеспечивают исполнители (маневровые локомотивы, сортировочные горки, бригады ПТО и др.). Принято, что каждую операцию должны выполнять исполнители строго определенной специализации (например, закрепление состава выполняет сигналист, осмотр вагонов – бригада ПТО, роспуск состава – маневровый локомотив и сортировочная горка и т. д.). В то же время исполнитель определенной специализации может выполнять несколько различных операций (например, сигналист выполняет закрепление состава и уборку тормозных башмаков). Отдельные пути и стрелочные зоны также могут рассматриваться как исполнители. Каждый исполнитель, который работает на станции, в модели технологического процесса представляется структурой (2.11). Каждый исполнитель имеет определенную специализацию, определяющую работы, которые он может выполнять. Если на станции есть несколько исполнителей одной специализации, то для выполнения работы может использоваться любой из свободных исполнителей данной специализации, а при необходимости в качестве

одного из параметров в структуре данных о работах может быть задан приоритет использования исполнителей.

Множество функций F представляет собой команды, которые выполняются при наступлении определенных событий в ФМС (занятие или освобождение путевого участка, начало или окончание технологической операции, нажатие кнопки на моторном поле информационной модели и т. д.).

3.2.2. Язык обработки сообщений ФМС

Взаимодействие структурных модулей ФМС (см. рис. 2.1) в процессе моделирования организовано путем передачи сообщений специальной структуры. Для анализа и обработки сообщений разработан специальный функциональный язык-интерпретатор. Сообщения генерируются при наступлении определенных событий в ФМС и поступают в модуль диспетчера команд. В каждом сообщении указывается его получатель – определенный структурный модуль ФМС. После анализа сообщения диспетчер команд направляет его для выполнения соответствующему получателю (модулю ФМС).

В качестве управляющих конструкций в сообщениях выступают текстовые выражения. Каждое выражение состоит из названия функции и ее аргументов и представляет собой следующую конструкцию:

$$(функция\ аргумент-1\ аргумент-2 \dots аргумент-N). \quad (3.1)$$

Здесь функция – это идентификатор команды, которая должна быть выполнена. Аргументами функции могут быть константы или выражения. Число аргументов может быть переменным. Каждое выражение вычисляется, и его результат возвращается в тот модуль ФМС, который является инициатором передачи данного сообщения. Результатом вычисления может быть число или текстовая строка. Анализ выполняется слева направо, пока не встретится открывающаяся или закрывающаяся скобка. Если встречается закрывающаяся скобка, то интерпретатор завершает анализ выражения, выполняет функцию и возвращает ее результат. Если встречается открывающаяся скобка, то осуществляется переход к анализу младшего уровня вложенности. В качестве аргументов выражений (3.1), формирующих сообщения в ФМС, кроме числовых и текстовых констант, могут

выступать различные функции: математические, логические, текстовые, управляющие, вспомогательные.

Математические функции используются для выполнения математических вычислений. Их аргументами и результатами вычислений являются целые и вещественные числа. Математические функции, которые используются в сообщениях ФМС, описаны в табл. 3.1.

Логические функции используются для сравнения между собой двух или более аргументов. Результатами логических функций являются значения «истина» (1) или «ложь» (0). Описание логических функций приведено в табл. 3.2.

Текстовые функции предназначены для работы со строками и текстовой информацией. Описание текстовых функций приведено в табл. 3.3.

Функции управления моделью станции позволяют изменять параметры объектов, а также формировать управляющие команды модели станции. При этом в качестве аргументов используются параметры объектов, исполнителей, работ, а также функции. Описание функций, используемых для управления моделью станции, приведено в табл. 3.4.

Вспомогательные функции используются для управления вычислениями в текстовых выражениях сообщений ФМС. Описание вспомогательных функций приведено в табл. 3.5.

3.2.3. Структура файла данных технологии

В ЭВМ технологический процесс работы станции представляется в виде файла данных специальной структуры. В соответствии со структурой объектно-ориентированной модели указанный файл состоит из четырех секций: «*Исполнители*», «*Работы*», «*Функции*» и «*Объекты*». Кроме того, в файл технологии включена дополнительная (вспомогательная) секция «*Определения*», которая располагается в его начале. Началом каждой секции является соответствующее ключевое слово. Исходные данные внутри секций представляются в виде ассоциативных списков, где данные интерпретируются в соответствии с предшествующими им ключевыми словами. Для примера, на рис. 3.1 представлена структура такого списка для описания работы.

Математические функции

Функция	Назначение	Пример	
		Выражение	Результат
(+ число1 число2 ...)	Возвращает сумму всех аргументов	(+ 1 3 5.2)	9.2
(- число1 число2 ...)	Вычитает число2 из число1. Если задано более двух аргументов, то из аргумента 1 вычитается сумма всех остальных аргументов	(- 7 2 1)	4
(* число1 число2 ...)	Возвращает произведение всех аргументов	(* 4 6 2)	48
(/ число1 число2 ...)	Делит число1 на число2. Если задано более двух аргументов, то аргумент 1 делится на произведение всех остальных аргументов	(/ 8 4)	2
(ABS число)	Возвращает абсолютное значение целого или вещественного числа	(ABS -45)	45
(INT число)	Возвращает результат преобразования вещественного числа в целое	(INT 43.6)	43
(RND)	Возвращает случайное число, равномерно распределенное в интервале [0, 1]	(RND)	0.543
(RNDZ M S)	Возвращает нормально распределенную случайную величину с параметрами $M[x] = M$, $\sigma[x] = S$	(RNDZ 10 2)	11.235
(ERLANG M K I)	Возвращает случайную величину, распределенную по закону Эрланга с параметрами $M[x] = M$, $k = K$, $x_{\min} = I$	(ERLANG 5 2 0)	3.234
(RAVNOM M1 M2)	Возвращает случайную величину, равномерно распределенную в интервале M1 M2	(RAVNOM 10 20)	12.235

Таблица 3.2

Логические функции

Функция	Назначение	Пример	
		Выражение	Результат
(AND <i>аргумент1</i> <i>аргумент2</i> ...)	Возвращает результат выполнения логического И над списком <i>аргументов</i>	(AND 1 0 1 1)	0
(OR <i>аргумент1</i> <i>аргумент2</i> ...)	Возвращает результат выполнения логического ИЛИ со списком <i>аргументов</i>	(OR 1 0 1 1)	1
(NOT <i>аргумент</i>)	Возвращает результат выполнения логического НЕ	(NOT 1)	0
(> <i>число1</i> <i>число2</i> ...)	Возвращает 1, если <i>число2</i> больше <i>числа1</i> . В противном случае возвращает 0	(> 10 2)	1
(<?? <i>число1</i> <i>число2</i> ...)	Возвращает 1, если <i>число2</i> меньше <i>числа1</i> . В противном случае возвращает 0	(< 5 2)	0
(= <i>число1</i> <i>число2</i>)	Возвращает 1, если <i>число2</i> равно <i>числу1</i> . В противном случае возвращает 0	(= 1 1)	1
(!= <i>число1</i> <i>число2</i>)	Возвращает 1, если <i>число2</i> не равно <i>числу1</i> . В противном случае возвращает 0	(!= 1 1)	0
(IN <i>аргумент1</i> <i>аргумент2</i> ... <i>аргументN</i>)	Возвращает 1, если <i>аргумент1</i> входит в список <i>аргумент2</i> ... <i>аргументN</i> . В противном случае возвращает 0.	(IN 2 2 1 5)	1
(BETWEEN <i>число1</i> <i>число2</i> <i>число3</i>)	Возвращает 1, если выполняется условие $\text{число1} \leq \text{число2} \leq \text{число3}$. В противном случае возвращает 0.	(BETWEEN 1 3 10)	0
(TRUE)	Возвращает 1	(TRUE)	1

Функция	Назначение	Пример	
		Выражение	Результат
(FALSE)	Возвращает 0	(FALSE)	0
(CHECKCONDOR <i>Макрос1</i> ... <i>МакросN</i>)	Почередно выполняет <i>макросы1...N</i> . Возвращает TRUE, если хотя бы один макрос возвращает ненулевой результат	–	

Таблица 3.3

Текстовые функции

Функция	Назначение	Пример	
		Выражение	Результат
(STRCAT <i>строка1</i> <i>строка2</i> ...)	Объединяет аргументы в одну строку	(STRCAT <i>Пример</i>)	Пример
(NTH <i>номер строка1</i> <i>строка2</i> ...)	Извлекает строку с указанным номером из списка <i>строк</i> . Первая строка в списке имеет номер 0	(NTH 1 <i>один два пять</i>)	Два
(TIME)	Возвращает системное время в секундах	(TIME)	345
(CLEAR)	Возвращает пустую строку	(CLEAR)	
(MEM <i>номер</i>)	Извлекает строку из ячейки памяти с указанным номером	(MEM 1)	Результат

Функция	Назначение	Пример	
		Выражение	Результат
(NOTE номер строка)	Заносит строку в ячейку памяти с указанным номером. Всего имеется 10 ячеек памяти, нумерация которой начинается с 0	(NOTE 1 Результат)	Результат
(WRITE строка)	Записывает строку в файл протокола. Возвращает 1, если запись удалась, и 0 – в противном случае	(WRITE строка)	1
(HEAD строка1 строка2 ...)	Извлекает первую строку из списка строк	(HEAD один два пять)	один
(TAIL строка1 строка2 ...)	Возвращает список, начиная со второго элемента	(TAIL один два пять)	два пять
(REPLASESTR строка1 строка2 строка3)	Ищет в строке3 последовательность символов строка1 и заменяет ее на строка2	(REPLASESTR к1 в2 кк1 в)	кв2в
(RNDELEM строка1...строкаN)	Возвращает случайный элемент из набора строк	(RNDELEM а б в1 прпп)	в1
(REMOVEELEM номер строка)	Удаляет элемент строки в позиции номер (нумерация элементов начинается с 0)	(REMOVEELEM 2 а1 б2 в3 г4)	а1 б2 г4
(GETELEM номер строка)	Возвращает элемент строки в позиции номер	(GETELEM 1 а1 б2 в3 г4)	б2
(SETELEM номер строка1 строка2 строка3 строка4)	Изменяет элемент строки в позиции номер на строка1	(SETELEM 3 кк а1 б2 в3 г4)	а1 б2 в3 кк
(STRCMP строка1 строка2)	Сравнивает строки строка1 и строка2. Возвращает 1 при их равенстве и 0 – в противном случае	(STRCMP один два)	0

Управляющие функции

Функция	Назначение	Пример
(OBJ)	Возвращает идентификатор объекта	(OBJ)
(GET <i>ключ1</i> <i>ключ2</i> ...)	Возвращает список параметров объекта в соответствии со списком <i>ключей</i> параметров	(GET 2001)
(SET <i>ключ1</i> <i>значение1</i> <i>ключ2</i> <i>значение2</i> ...)	Устанавливает новые значения указанных (в соответствии со списком <i>ключей</i>) параметров объекта	(SET 2001 40)
(ADD <i>ключ</i> <i>число</i>)	Увеличивает значение параметра (<i>ключ</i>) объекта на заданную величину (<i>число</i>). Возвращает новое значение свойства	(ADD 1526 6)
(DECREASE <i>ключ</i> <i>число</i>)	Уменьшает значение параметра (<i>ключ</i>) объекта на заданную величину (<i>число</i>). Возвращает новое значение свойства	(DECREASE 1526 6)
(STATE)	Возвращает текущее состояние конечного автомата объекта	(STATE)
(PLANID)	Возвращает идентификатор объекта в модели занятия путей	(PLANID)
(EXECNAME <i>специализация</i>)	Возвращает имя исполнителя указанной <i>специализации</i> , занятого обслуживанием объекта	(EXECNAME 1)
(GETEXECUTOR <i>специализация</i>)	Занять исполнителя указанной <i>специализации</i>	(GETEXECUTOR 1)
(EXECID <i>специализация</i>)	Возвращает идентификатор исполнителя указанной <i>специализации</i> , занятого обслуживанием объекта	(EXECID 1)
(FREEEXECUTOR <i>специализация</i>)	Освободить исполнителя указанной <i>специализации</i>	(FREEEXECUTOR 1)
(ADDWORK <i>идентификатор</i>)	Начать выполнение с объектом работы с указанным <i>идентификатором</i>	(ADDWORK 1)

Окончание табл. 3.4

Функция	Назначение	Пример
(REMOVEWORK идентификатор)	Прервать выполнение с объектом работы с указанным идентификатором	(REMOVEWORK 1)
(WORKTIME объект работа)	Возвращает время до окончания заданной работы с объектом	(WORKTIME 1 12)
(STATEWORK объект состояние работа время)	Проверяет состояние указанной работы с объектом, возвращает 1, если объект находится в заданном состоянии и работа длится не менее заданного времени (в секундах)	(STATEWORK 1 2 12 300)
(FINDSTATEWORK объект состояние работа время)	Выполняет поиск объекта, который находится в заданном состоянии и с которым выполняется указанная работа не менее заданного времени	(FINDSTATEWORK 1 2 12 300)
(COM аргументы)	Послать команду в диспетчер команд	(COM 3 6 1)

Вспомогательные функции

(FUNC номер)		(FUNC I)	0
(FOREACH номер начальная_арг аргумент1 аргумент2...)	Выполняет макрокоманду с указанным номером, которая описана в секции функции	(FOREACH I I 2 4 5 3)	0
(USERFUNC номер)	Выполняет пользовательскую функцию с указанным номером	(USERFUNC I 2)	0
(IF аргумент1 аргумент2 аргумент3)	Если аргумент1 не равен 0, то возвращает аргумент2, иначе возвращает аргумент3	(IF (1<2) 3 7)	3
(RETURN)	Переход на более старший уровень вложенности выражения	(RETURN)	0

В секции «*Определения*» указываются коды специализаций исполнителей, а также коды возможных событий и команд. Началом описания является ключевое слово «*Определение*». В следующей строке указывается код определения (табл. 3.6) и его словесное описание.

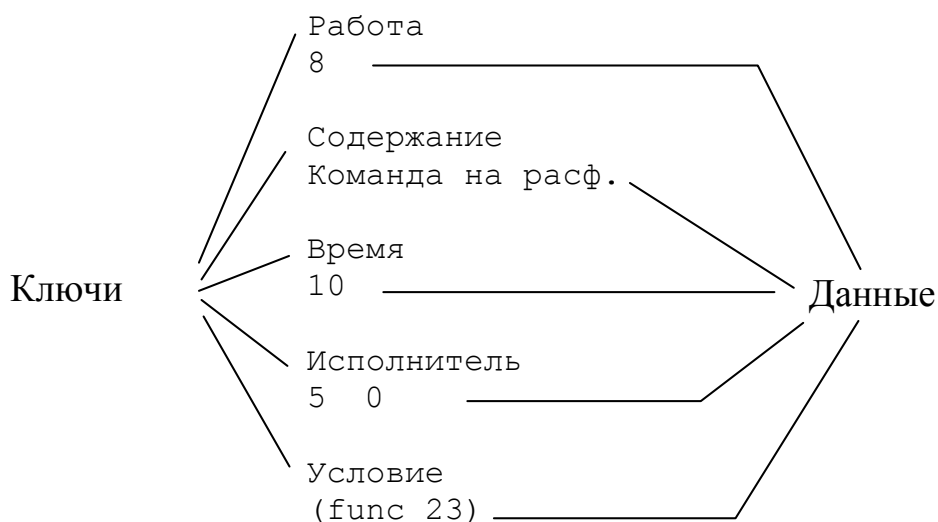


Рис. 3.1. Структура ассоциативного списка для элемента «Работа»

Таблица 3.6

Кодирование определений в файле технологии

Диапазон кодов	Тип определения	Пример
1–199	Специализация исполнителя	3 Маневровый локомотив
201–399	Событие	206 Остановка поезда на пути
401–599	Команда	406 Согласие на прием поезда

В секции «*Исполнители*» приводится описание исполнителей технологических операций. Описание каждого исполнителя начинается ключевым словом «*Исполнитель*». В следующей строке указывается уникальный идентификатор исполнителя, далее следуют ключевые слова (идентификаторы параметров исполнителя) и соответствующие им данные (табл. 3.7).

В секции «*Работы*» приводятся данные о технологических операциях, выполняемых с объектом каждого типа. Началом описания каждой технологической операции является ключевое слово «*Работа*»,

а завершением – это же слово «Работа» (начало описания новой операции) или слово «Функции». После ключевого слова «Работа» указывается идентификатор работы N . В качестве идентификатора может использоваться уникальное целое число $0 < N < 100$. Далее следуют необязательные ключевые слова (идентификаторы параметров работы) и соответствующие им данные (табл. 3.8).

Таблица 3.7

Представление исполнителей в файле технологии

Ключевое слово	Данные	Описание	Пример
Название	Текстовая строка	Используется для словесного описания исполнителя	Название Сигналист поста 5
Специализация	Целое число	Определяет принадлежность исполнителя к группе взаимозаменяемых исполнителей	Специализация 1

Алгоритм моделирования выполнения технологической операции (работы) представлен на рис. 3.2.

В секции «Функции» приводится описание макрокоманд. Началом описания макрокоманды является ключевое слово «Функция», завершением описания – ключевое слово «Функция» (начало описания новой макрокоманды) или ключевое слово «Объекты». После ключевого слова «Функция» указывается идентификатор функции – целое число, а все последующие строки рассматриваются как выражения (3.1). Результатом вычисления макрокоманды является результат вычисления последнего обработанного выражения. Выполнение макрокоманды прерывается, если после вычисления очередного выражения возвращен результат «FALSE».

В секции «Объекты» содержатся параметры объектов, которые обслуживаются на станции (поездов, локомотивов, вагонов) и соответствующие этим объектам конечные автоматы (2.13), на основе которых формализованы технологические процессы обслуживания объектов. При этом каждый тип (категория) объектов имеет отдельное описание соответствующего КА в файле технологии.

Представление работ в файле технологии

Ключевое слово	Данные	Описание	Пример
Содержание	Текстовая строка	Используется для пояснения смысла работы, при выполнении моделирования не используется	Содержание Команда на расформирование
Время	Вещественное число или выражение	Задаёт продолжительность выполнения работы в секундах. Если в качестве данных задано выражение, его вычисление выполняется при инициализации работы	Время 10
Исполнитель	Специализация Флаг освобождения исполнителя	Занимает и освобождает исполнителей указанной специализации для выполнения работы. Если в качестве специализации указывается число $-S$, то специализация устанавливается в результате вычисления функции S . Флаг освобождения I переводит исполнителя в список свободных исполнителей, а флаг O переводит его в список исполнителей, ожидающих выполнения операций с объектом	Исполнитель 5 0
Условие	Выражение	Любое выражение, которое должно быть выполнено до завершения работы. Модель проверяет истинность выражения в соответствии с указанным порядком	Выражение (com 2 21 (get 1551))
Сигнал	Целое число	По умолчанию после завершения работы в КА соответствующего объекта в качестве сигнала посылается номер работы, однако данный параметр позволяет изменить этот сигнал. Например, значение 0 указывает на то, что при завершении работы сигнал в КА объекта не посылается	Сигнал 0

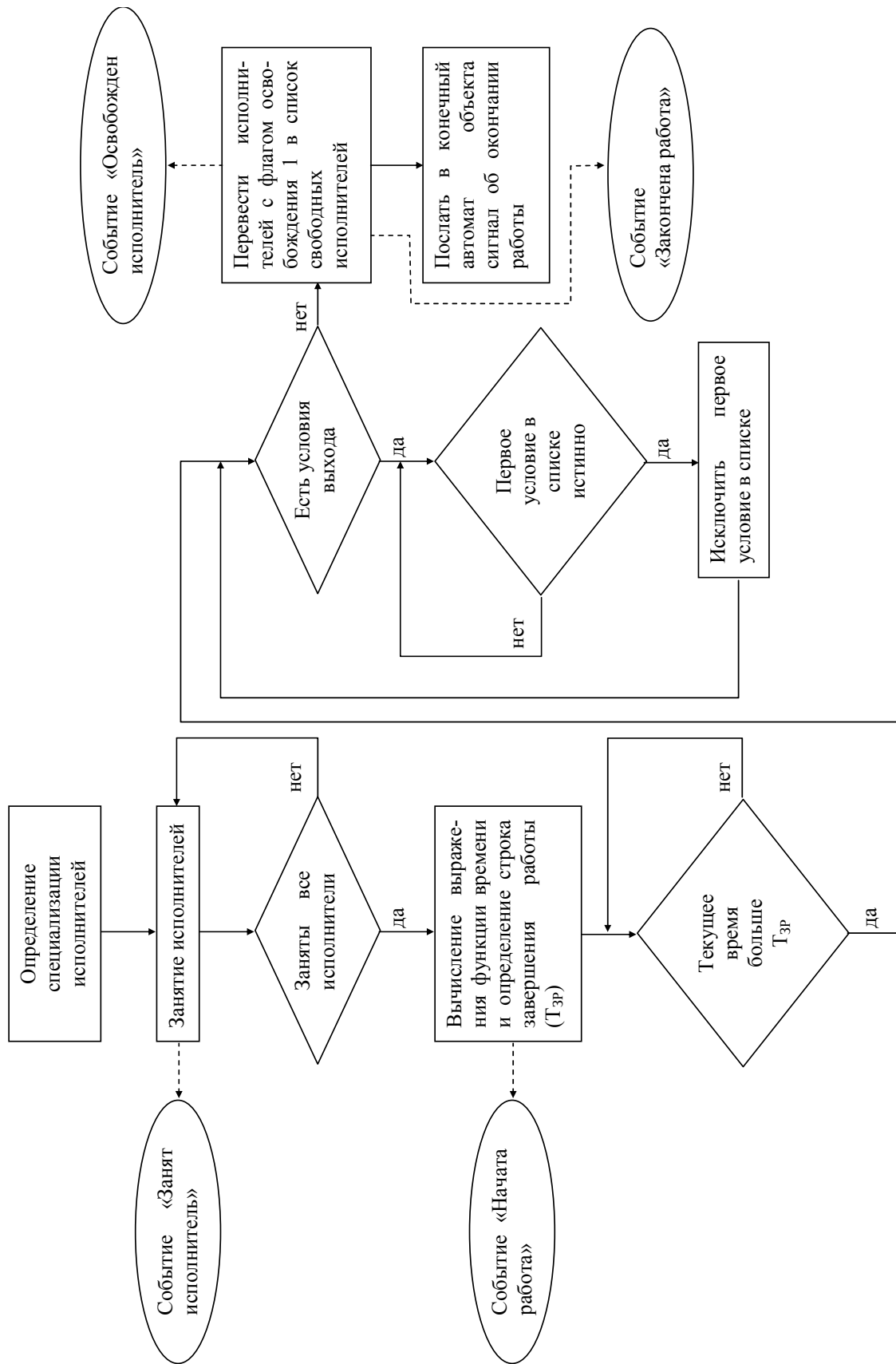


Рис. 3.2. Алгоритм моделирования технологической операции

Началом описания объекта является ключевое слово «Объект», завершением – это же ключевое слово «Объект» (начало описания нового объекта) или конец файла. За ключевым словом следует строка, в которой указывается номер объекта и его название:

1 Поезд в расформирование

Далее следует блок описания параметров объекта. Описание каждого параметра выполняется после ключевого слова «Параметр». В следующей строке указывается код параметра, его значение и название. При этом кодам 1 001–1 999 соответствуют числовые параметры с целочисленными значениями, кодам 2 001–2 999 – числовые параметры с вещественными значениями, кодам 3 001–3 999 – текстовые параметры. Пример описания параметра объекта:

Параметр
1504 50 Число вагонов

Основой информации о каждом типе объектов является описание конечного автомата, на основе которого формализован технологический процесс обслуживания объектов данного типа (2.13). В файле технологии конечный автомат представляется набором его возможных состояний, для каждого из которых указывается множество входящих сигналов с соответствующими им выходными сигналами и переходами. Ключевым словом при этом является слово «Состояние», а следующая строка записывается в формате

$$N X Y C$$

где N – номер (целое число) состояния объекта, которое характеризует определенную фазу технологического процесса;

X, Y – координаты положения графического примитива, соответствующего состоянию объекта, на схеме данных в редакторе файла технологии;

C – примечание – текстовая строка.

Параметры X, Y, C при моделировании не используются и необходимы для графического ввода файла технологии с помощью специального редактора.

Каждый из входящих сигналов, возможных для данного состояния N , представляется строкой

$$C \quad K \quad \Pi \quad B \quad Y \quad S_1 \quad L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad S_2$$

- где C – входной сигнал;
 K – идентификатор макроса входного контроля. $K = 0$ соответствует отсутствию входного контроля;
 Π – номер состояния, в которое осуществляется переход после получения данного сигнала; если $\Pi = N$ – объект остается в том же состоянии N , если $\Pi = 9\,999$ – конец обработки объекта;
 B – идентификатор макроса, соответствующего функции выхода;
 Y – ордината начала линии в системе координат события;
 S_1, S_2 – положение конечной точки линии в графических примитивах, соответствующих начальному и конечному событиям: 1 – справа, 0 – слева;
 L_1, L_2, L_3 – длины отрезков линии, соединяющей графические примитивы, соответствующие начальному и конечному событиям.

Параметры S_1, S_2, L_1, L_2, L_3 при моделировании не используются и необходимы для графического ввода файла технологии с помощью специального редактора (рис. 3.3).

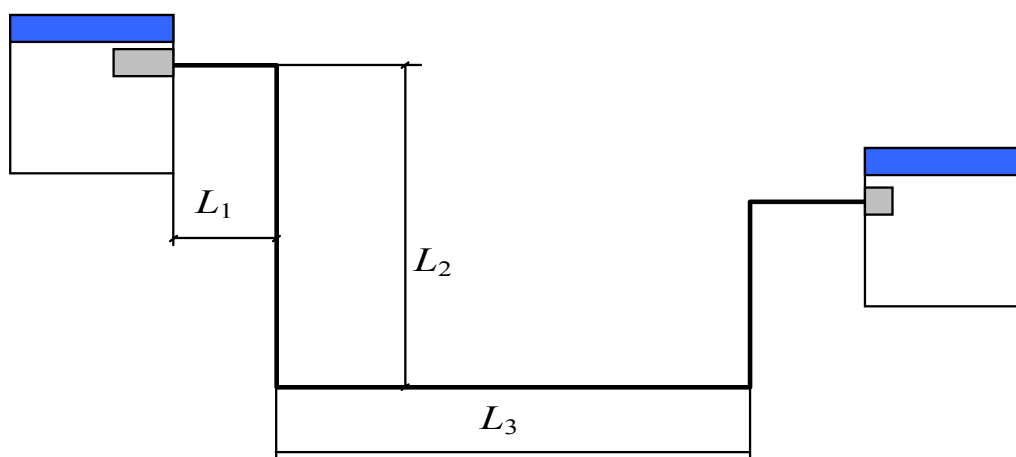


Рис. 3.3. Изображение линии, соединяющей события КА в редакторе файла технологии

3.3. Автоматизация построения модели технологического процесса

Редактор технологического процесса. Формирование файла данных, который является основой для моделирования технологического процесса работы станции, представляет достаточно трудоемкую задачу. Вследствие достаточно сложной структуры файла данных МТП при его ручном формировании возможны ошибки и неточности, особенно при формализации технологии работы крупных станций. Для автоматизации формирования файла технологии авторами были разработаны специальные инструментальные средства – редактор технологического процесса [103]. Данный редактор позволяет реализовать следующие функции:

- ввод данных о работах, функциях и исполнителях с помощью специальных форм и диалоговых окон;
- графическое формирование графов конечных автоматов, которые описывают технологические процессы обслуживания объектов разных типов;
- первичный форматный и логический контроль данных;
- файловые операции (открытие, сохранение, редактирование файла).

Окно редактора технологии в процессе ввода конечного автомата представлено на рис. 3.4.

Построение файла данных МТП с помощью разработанного редактора технологического процесса выполняется в следующем порядке:

- создание объектов и определение их свойств;
- создание определений: специализаций исполнителей, эксплуатационных событий, команд;
- создание исполнителей и определение их свойств;
- создание функций;
- создание работ и определение их свойств;
- построение структуры КА для каждого из типов объектов, обслуживание или функционирование которых предусмотрено на станции.

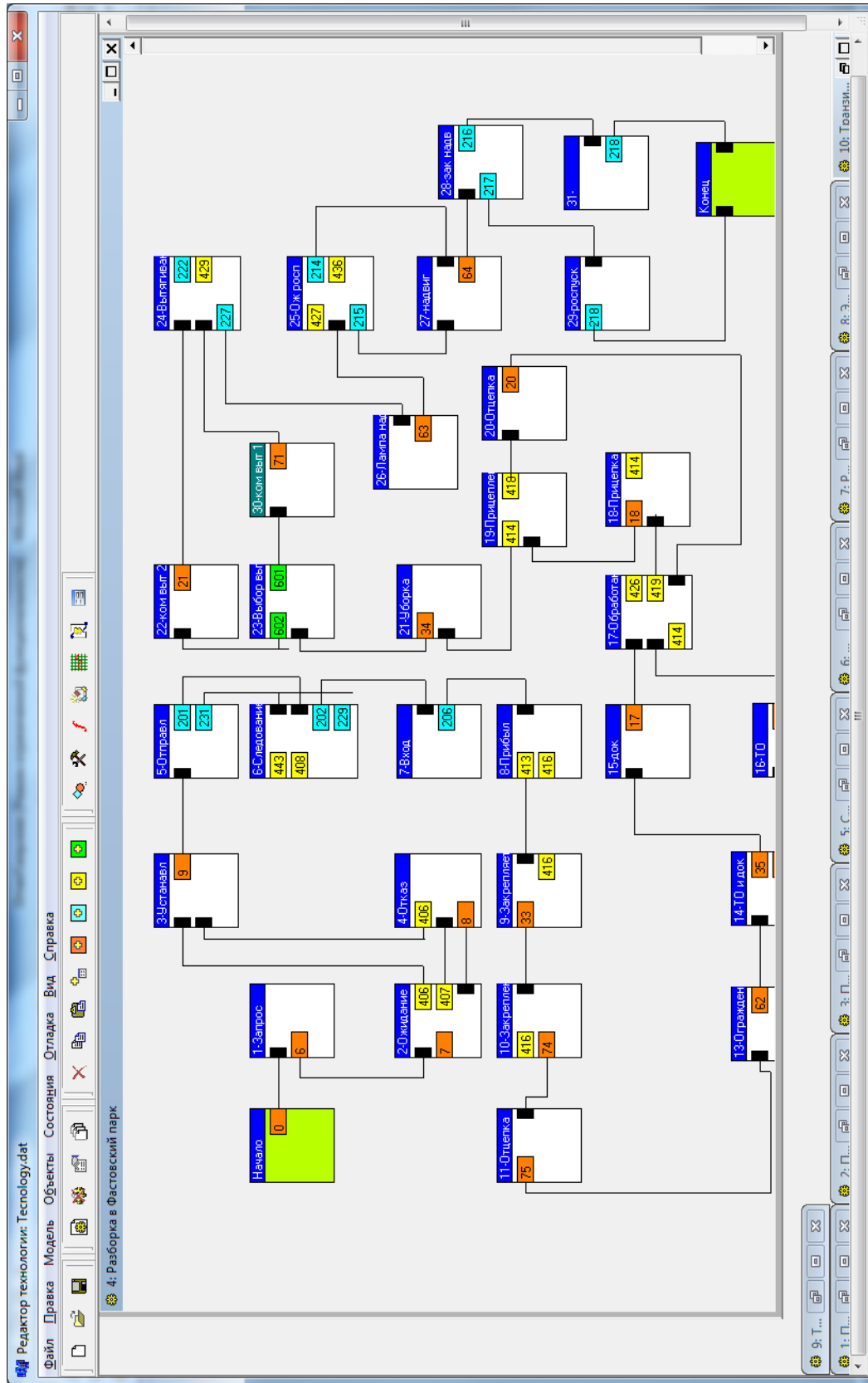













Рис. 3.4. Окно редактора технологии при построении конечного автомата объекта



Управление работой редактора осуществляется с помощью панели инструментов и команд меню. Назначение основных команд меню и кнопок панели инструментов приведено в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Назначение команд меню и кнопок панели инструментов редактора

Команда меню	Кнопка	Назначение
Файл → Создать		Создает новый файл технологии
Файл → Открыть		Открывает существующий файл технологии
Файл → Сохранить		Сохраняет файл технологии с текущим именем
Файл → Сохранить как	–	Сохраняет файл технологии с новым именем
Файл → История файлов	–	Позволяет просмотреть ранее открытые файлы
Файл → Выход	–	Закрывает редактор технологии
Правка → Определения (Исполнители, Функции, Работы)	–	Открывает списки ранее созданных элементов для их просмотра или редактирования
Модель → Список объектов		Открывает список всех созданных объектов
Объект → Создать		Создает новый объект
Объект → Удалить		Удаляет выделенный объект
Объект → Свойства		Открывает форму «Объект: свойства»
Состояния → Создать		Добавляет новое состояние к объекту
Состояния → Удалить		Удаляет выделенное состояние
Состояния → Свойства	–	Открывает форму «Состояние: свойства»
Состояния → Добавить работу		Добавляет работу к выделенному состоянию
Состояния → Добавить команду		Добавляет команду к выделенному состоянию

Команда меню	Кнопка	Назначение
Состояние → Добавить событие		Добавляет событие к выделенному состоянию
Инструменты → Функции		Форма для ввода секции «Функции»
Инструменты → Определения		Форма для ввода секции «Определения»
Инструменты → Исполнители		Форма для ввода секции «Исполнители»
Инструменты → Работы		Форма для ввода секции «Работы»

Создание объектов и определение их свойств. Для создания нового объекта (типа объектов) необходимо выполнить команду **Создать** в меню **Объекты** или нажать кнопку  на панели инструментов. В результате будет создано новое окно *Объект: свойства*, которое соответствует новому типу объектов. Для задания нужных свойств созданного (существующего) объекта необходимо выполнить команду **Свойства** в меню **Объекты** или нажать кнопку  на панели инструментов. В результате этих действий будет открыто окно редактирования свойств объекта (рис. 3.5, а).

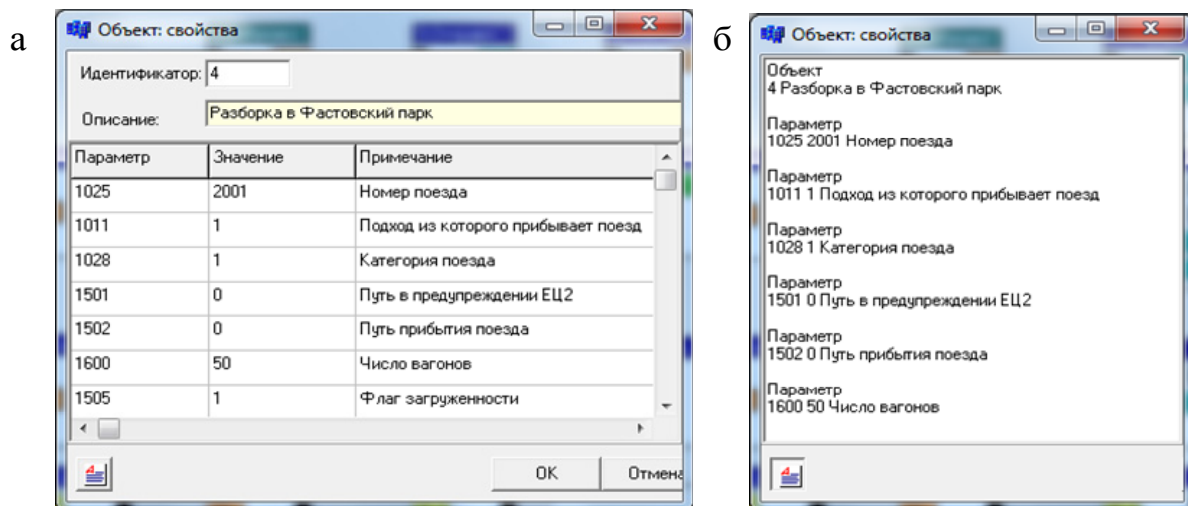




Рис. 3.5. Диалоговое окно редактирования свойств объекта:
а – форма для редактирования; б – текстовая запись в файле данных

В данном окне (см. рис. 3.5, а) может быть изменен идентификатор и описание объекта. В таблице параметров могут быть заданы значения обязательных параметров и определены пользовательские параметры. Нажатие кнопки  переводит описание объекта в текстовую форму файла данных (см. рис. 3.5, б). Для просмотра списка объектов можно нажать кнопку , в результате чего будет открыто окно *Объекты* (рис. 3.6).

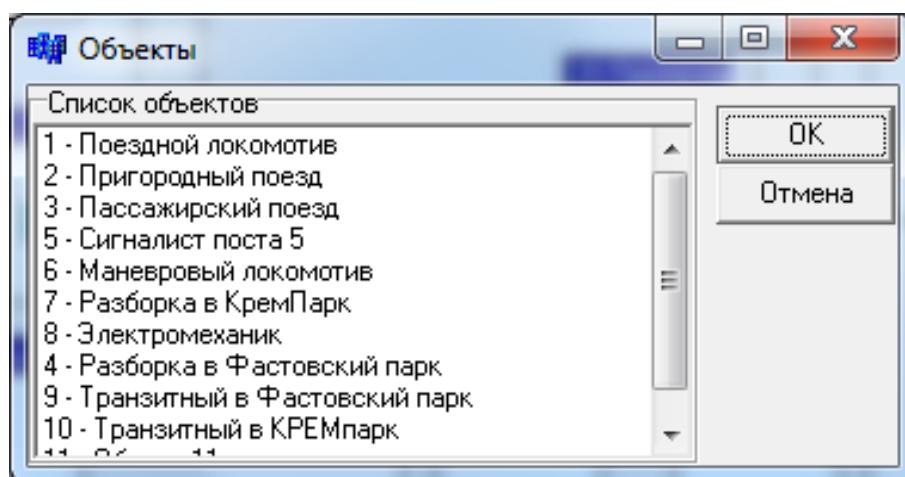






Рис. 3.6. Окно списка объектов в файле технологии

Создание и редактирование определений. Для создания или редактирования определений необходимо выполнить команду меню **Правка** → **Определения** или нажать кнопку  на панели инструментов. В результате этих действий будет открыто диалоговое окно *Определения*, представленное на рис. 3.7, а. Редактирование определений может выполняться также в текстовой форме непосредственно в файле технологии. Для этого необходимо в окне *Определения* нажать кнопку  (рис. 3.7, б). Для сохранения внесенных изменений необходимо нажать кнопку .

Создание и редактирование данных об исполнителях. Для создания или редактирования данных об исполнителях необходимо выполнить команду меню **Правка** → **Исполнители** или нажать кнопку  на панели инструментов. В результате этих действий будет открыто диалоговое окно *Исполнители*, представленное на рис. 3.8.

В диалоговом окне (см. рис. 3.8) представлен список существующих (созданных ранее) исполнителей, элементы управления для

редактирования данных нужного исполнителя, а также панель инструментов. Для создания нового исполнителя необходимо ввести его идентификатор в соответствующее поле. В поле «Название» необходимо ввести текстовую строку описания исполнителя. Специализация исполнителей выбирается в списке специализаций. Открыть окно *Определения* для редактирования списка специализаций можно путем нажатия кнопки ..., которая расположена возле соответствующего списка.

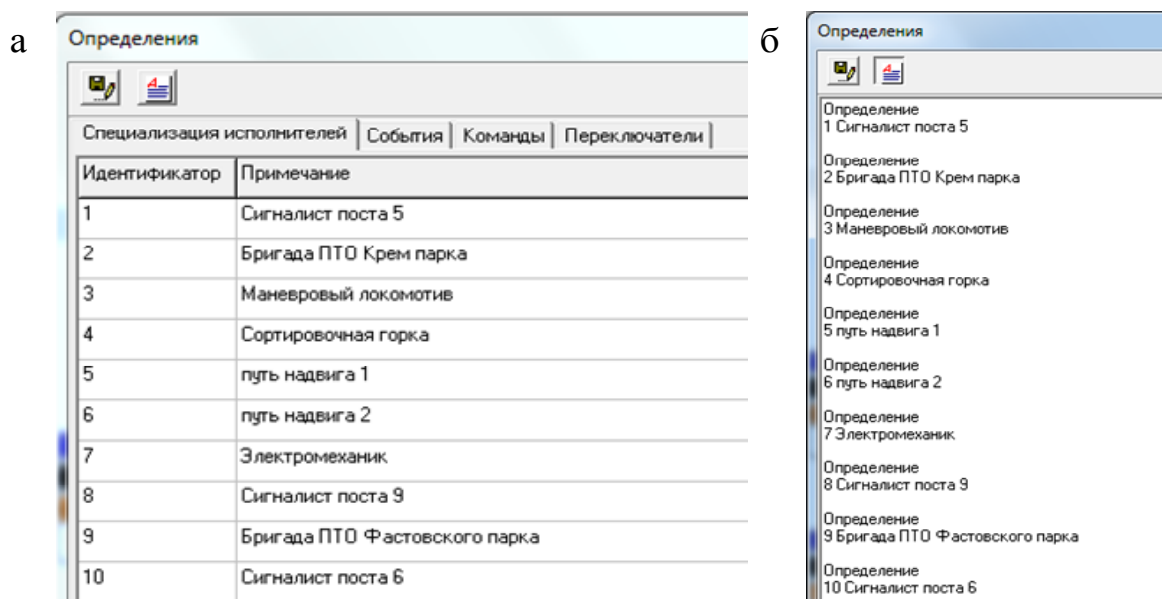


Рис. 3.7. Диалоговое окно редактирования определений:
 а – форма для редактирования; б – текстовая запись в файле данных

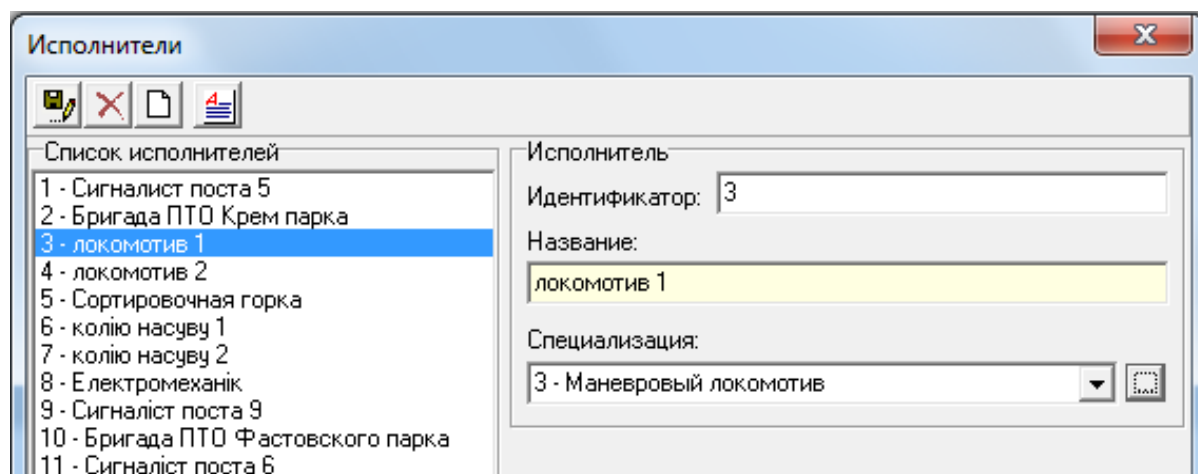













Рис. 3.8. Диалоговое окно редактирования данных об исполнителях

Для редактирования данных существующего исполнителя необходимо выделить его щелчком левой кнопки мыши в списке исполнителей и изменить соответствующие поля. Редактирование данных исполнителя может выполняться также в текстовой форме. Для перехода в текстовую форму редактирования необходимо нажать кнопку . Для сохранения внесенных изменений необходимо нажать кнопку . Для удаления исполнителя необходимо выделить его в списке и нажать кнопку . Для очистки полей редактирования свойств исполнителя необходимо нажать кнопку .


Создание и редактирование функций. Функция – это операция или набор операций (макрос), которые необходимо выполнить в процессе моделирования при наступлении определенных событий. Для создания или редактирования функций (макросов) необходимо выполнить команду меню **Правка** → **Макросы** или нажать кнопку  на панели инструментов. В результате этих действий будет открыто диалоговое окно *Макросы*, представленное на рис. 3.9.

В левой части диалогового окна (см. рис. 3.9) расположен список созданных ранее функций. Для выбора существующей функции необходимо щелкнуть по ней мышкой или ввести ее номер в поле «Идентификатор». Для того, чтобы создать новую функцию необходимо ввести новое значение в поле «Идентификатор». В правой части окна располагается идентификатор и описание функции, а также список выражений (команд), которые выполняет данная функция (см. п. 3.2.2). Для создания новой функции необходимо ввести новое значение (номер) в поле «Идентификатор» и нажать кнопку  для сохранения внесенных изменений. Для редактирования существующей функции необходимо выделить ее щелчком левой кнопки мыши в списке функций и изменить соответствующие поля. Редактирование функции может выполняться также в текстовой форме; для этого необходимо нажать кнопку . Для сохранения внесенных изменений необходимо нажать кнопку , а для удаления функции – выделить ее в списке и нажать кнопку . С помощью кнопки  можно очистить поля редактирования свойств функции. Нажатие кнопки  открывает меню с перечнем диалоговых окон для формирования функций.

Функции записываются в виде текстовых выражений специально разработанной структуры (см. п. 3.2.2). Для ускорения редактирования сложных выражений можно использовать построитель

выражений, который вызывается двойным щелчком левой кнопки мыши по соответствующей строке списка «Выражения» в окне *Макросы* (рис. 3.10).

В верхней части окна (см. рис. 3.10) располагается поле ввода выражения, а в нижней – списки функций (табл. 3.1–3.5), моделей (структурных модулей ФМС), созданных ранее функций (макросов) и свойств объектов. Для того чтобы добавить их в выражение функции, необходимо дважды щелкнуть по ним левой кнопкой мыши. В нижней части окна приводится подсказка по выбранной функции.

Формирование данных о работах. Создание и редактирование работ (технологических операций) осуществляется с помощью диалогового окна *Работы* (рис. 3.11), для вывода которого необходимо выбрать команду меню **Правка** → **Работы** или нажать кнопку  на панели инструментов.

В левой части окна располагается список созданных ранее работ. Порядок редактирования, добавления и удаления работ аналогичен исполнителям и функциям. В правой части окна располагаются поля «Идентификатор», «Описание», «Выходной сигнал» и «Время».

Если поле «Выходной сигнал» остается незаполненным, то после выполнения работы в качестве сигнала в конечный автомат объекта, к которому относиться данная работы, будет послан номер этой работы; в других случаях в КА объекта посылается сигнал, записанный в данном поле.

В поле «Время» может быть введено числовое значение, определяющее продолжительность выполнения работы в секундах, или выражение, позволяющее определять ее в процессе моделирования. Группа элементов управления «Исполнители» позволяет определять возможность использования исполнителей при завершении работы (освободить исполнителя или оставить занятым). Поля «Условия выхода» используются для задания функций (макросов), которые должны быть выполнены до окончания работы. При этом предусмотрено выполнение функций, как при завершении работ, так и в случае получения разрешения на их начало (поле «Разрешена»), в начале выполнения работ (поле «Начата») и перед завершением работ (поле «Перед окончанием»).

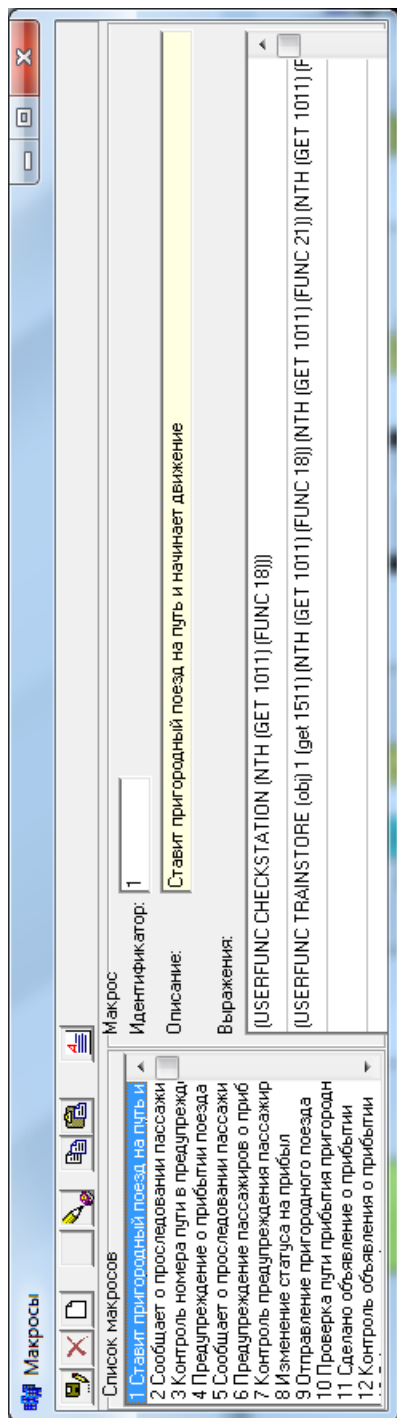


Рис. 3.9. Диалоговое окно редактирования функций



Рис. 3.10. Окно построителя выражений

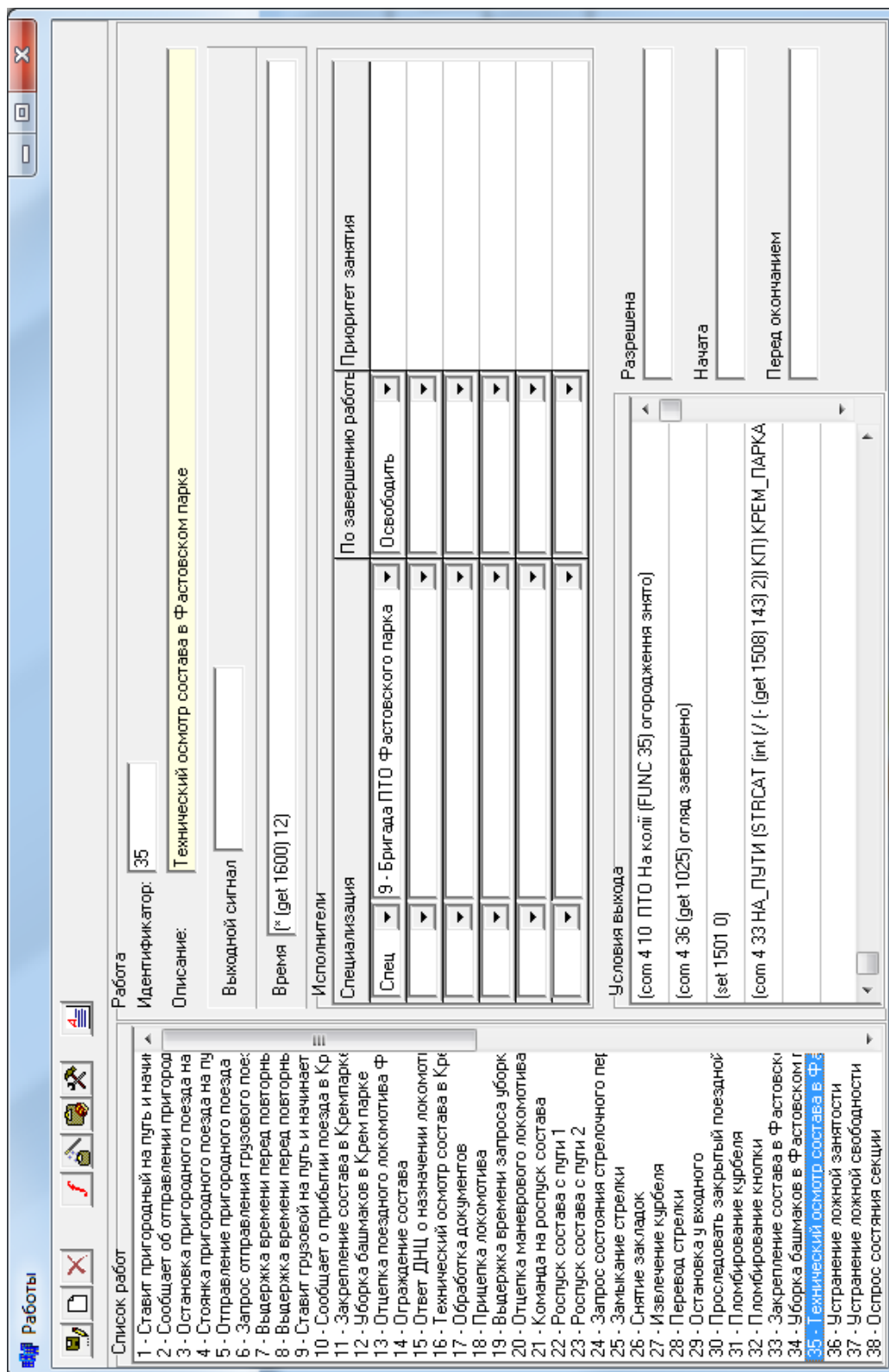

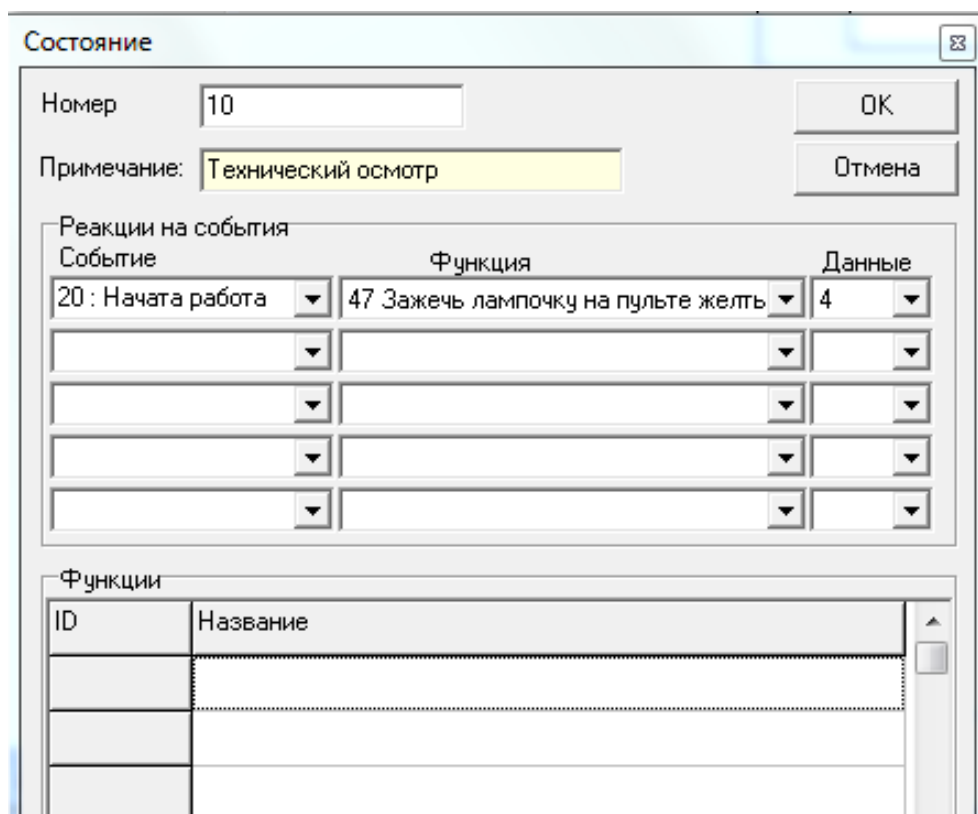


Рис. 3.1.1. Окно редактирования данных о работах

Построение конечных автоматов. На завершающем этапе формирования файла технологии с помощью редактора выполняется построение графов конечных автоматов, каждый из которых соответствует технологическому процессу обслуживания или функционирования определенного типа объектов. Соответственно, для каждого типа объектов, обслуживание или функционирование которых предусматривается на моделируемой станции, должны быть разработаны отдельные КА.

Для добавления нового состояния конечного автомата для определенного (созданного ранее) объекта необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши в окне этого объекта и в появившемся контекстном меню выбрать команду **Добавить состояние** (тот же результат можно получить, нажав кнопку  на панели инструментов). Для изменения свойств существующего состояния необходимо щелкнуть на нем правой кнопкой мыши и выполнить команду **Свойства** в контекстном меню или выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши в поле состояния. В результате этих действий будет открыто диалоговое окно «Состояние», представленное на рис. 3.12.



Реакции на события		
Событие	Функция	Данные
20 : Начата работа	47 Зажечь лампочку на пульте жельть	4

Функции	
ID	Название

Рис. 3.12. Окно настройки свойств состояния КА

В верхней части окна *Состояние* отображается «Номер» и «Примечание» состояния, которое поясняет соответствующую этому состоянию фазу технологического процесса обслуживания (функционирования) объекта. В средней части окна размещена группа элементов управления, позволяющих настраивать реакцию объекта в данном состоянии на события, происходящие в процессе моделирования. В нижней части окна представлен список функций (макросов) состояния, которые инициирует объект, находясь в данном состоянии. Для добавления новой функции или редактирования существующей необходимо выполнить двойной щелчок мышью по свободной строке и в появившемся диалоговом окне *Макрос* (рис. 3.13) задать требуемые параметры функции (см. п. 3.3.5). Для удаления функции необходимо в окне *Состояние* (см. рис. 3.12) выделить соответствующую строку и нажать клавишу DELETE.

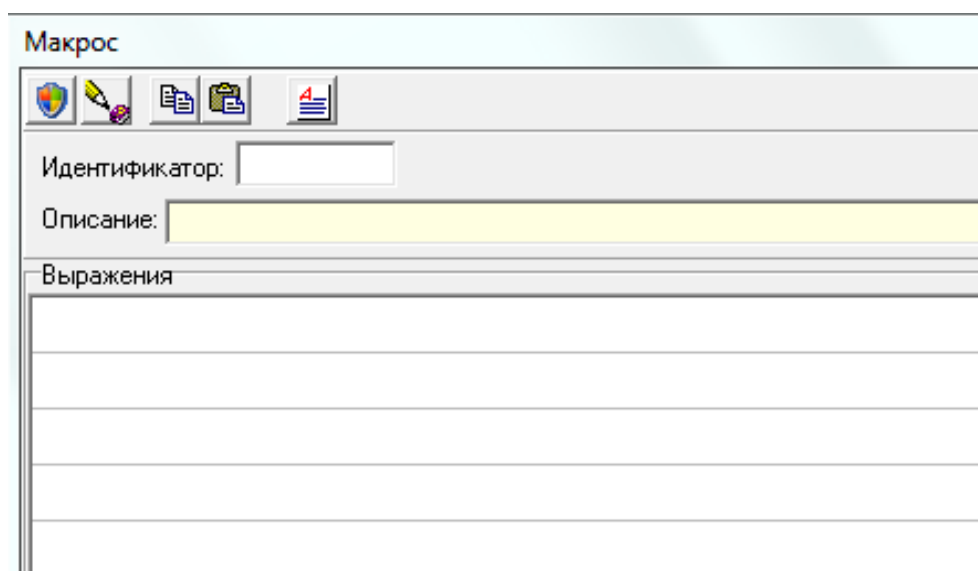





Рис. 3.13. Окно редактирования свойств функций

Для выделения состояния КА необходимо щелкнуть на нем левой кнопкой мыши. Для выделения нескольких состояний одновременно необходимо сначала выделить одно состояние, а при последующих нажатиях левой кнопки мыши удерживать клавишу Shift. Группу состояний можно также выделить, нажав левую кнопку мыши, и обвести их прямоугольником выделения.

Когда объект находится в определенном состоянии, на вход соответствующего КА могут поступить сигналы о завершении работ, о свершении эксплуатационных событий и команды от ЛВМ на нача-

ло работ. Для задания параметров входящего сигнала для состоянию КА необходимо выделить это состояние и выполнить одну из команд группы **Сигналы** в меню **Состояния** (табл. 3.9): **Добавить работу** (или кнопка  на панели инструментов), **Добавить событие** (или кнопка ), **Добавить команду** (или кнопка ). Доступ к этим командам также может быть получен и в контекстном меню, которое появляется при щелчке правой кнопкой мыши в поле состояния. Настройка входящих сигналов выполняется в диалоговых окнах, соответствующих типу сигнала (рис. 3.14, а, б, в). В диалоговых окнах для каждого входящего сигнала могут быть установлены функция входного контроля и функция выхода. Посредством нажатия кнопок «Состояние» и «Автомат» может быть получен доступ к соответствующим диалоговым окнам (см. рис. 3.12 и рис. 3.5).

Входящие сигналы изображаются в полях соответствующих состояний КА в виде прямоугольников. Для редактирования параметров входящих сигналов необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на прямоугольнике, соответствующем сигналу, и выполнить команду **Изменить** в контекстном меню; для удаления входящего сигнала в указанном контекстном меню необходимо выбрать команду **Удалить**.

Для создания связи (перехода) между состояниями необходимо нажать левую кнопку мыши на прямоугольнике, который соответствует входящему сигналу, и, удерживая ее нажатой, перетащить указатель на другое состояние. Если кнопка мыши будет отпущена в поле объекта, то будет выдан запрос на создание нового состояния. Для удаления связи между состояниями необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на сигнале, который служит началом данного перехода, и в контекстном меню выбрать команду **Удалить связь**.

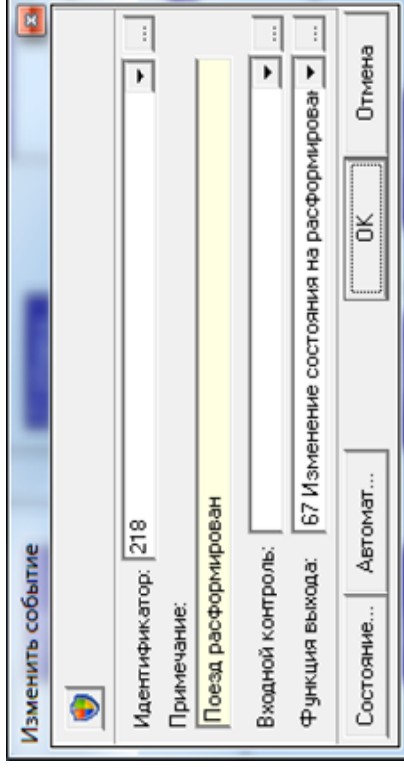
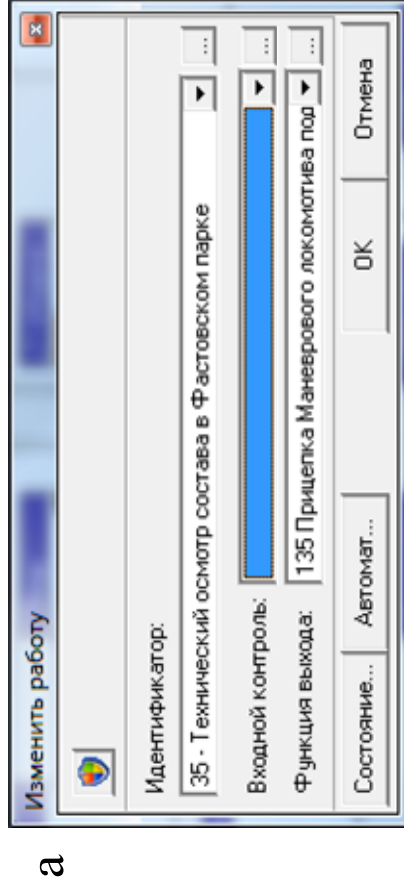


Рис. 3.14. Диалоговое окно для настройки входящих сигналов:

а – завершение работы; *б* – событие; *в* – команда ЛВМ

Идентификация функциональной модели железнодорожной станции и оценка ее адекватности

4.1. Основные принципы идентификации моделей железнодорожных станций

Идентификация выполняется в целях подготовки разработанной функциональной модели для дальнейшего использования при исследовании работы конкретной станции. При этом все параметры модели получают определенные значения, которые отражают техническое оснащение и технологический процесс работы реальной станции. Вывод о работоспособности ФМС, полученной в результате идентификации, и о ее пригодности для выполнения исследований проверяется путем оценки адекватности модели.

Построение адекватной модели для конкретной станции возможно лишь в том случае, если идентификация указанной модели выполнена на основе достоверных данных о функционировании этой станции. Таким образом, при построении ФМС важным этапом является комплексное обследование железнодорожной станции в целях сбора массива первичной информации, необходимой для идентификации модели. Учитывая, что процесс сбора первичной информации о железнодорожных станциях зачастую связан с выездами в командировки и работой в условиях повышенной опасности, а также ограничен по времени выполнения обследования, то общая эффективность этапа сбора информации существенным образом зависит от выбранных методов обследования и предварительной подготовки к нему. Результатом ошибок, которые могут быть допущены на этапе обследования, является получение недостоверных или неполных исходных данных и, как следствие, построение неадекватной модели станции. В связи с этим методы, используемые для сбора информации о железно-

дорожных станциях, должны быть систематизированы и существенным образом формализованы.

Необходимо отметить, что технологические процессы работы железнодорожных станций в значительной степени унифицированы, и этот факт позволяет создать типовые методики их обследования. Применение этих методик также упростит взаимодействие между исполнителями работ по обследованию и работниками железнодорожных станций.

Авторами выполнен комплексный анализ возможных методов сбора информации о функционировании сложных инфраструктурных объектов (рис. 4.1) и разработаны рекомендации по их применению при обследовании железнодорожных станций [104, 105]. Так, по источникам получения вся информация об объекте обследования может быть классифицирована как первичная и вторичная. Под первичной понимают информацию, которая получена непосредственно на объекте исследования в результате проведения специального обследования. Под вторичной понимают информацию об объекте исследования, которая была собрана ранее и может быть получена из внутренних и внешних источников.

Первичная информация о железнодорожных станциях может быть получена в результате производственных экскурсий, опросов и наблюдений (см. рис. 4.1). Основным методом получения вторичной информации о железнодорожных станциях является изучение документации. Опыт проведения обследований различных станций показывает, что основными источниками вторичной информации об их функционировании являются технико-распорядительный акт (ТРА) и технологический процесс работы станции, а также формы первичной учетной документации, оперативно-статистической отчетности, графики выполненной работы станции, архив банка данных автоматизированных систем управления работой станции. Практический опыт использования информации из указанных источников для комплексного анализа работы станций показывает, что она существенно отличается по достоверности и возможности применения для анализа событий, которые происходили на станциях в разные периоды времени. В этой связи информация, собранная из вторичных источников, должна сравниваться с данными, собранными в виде первичной информации.

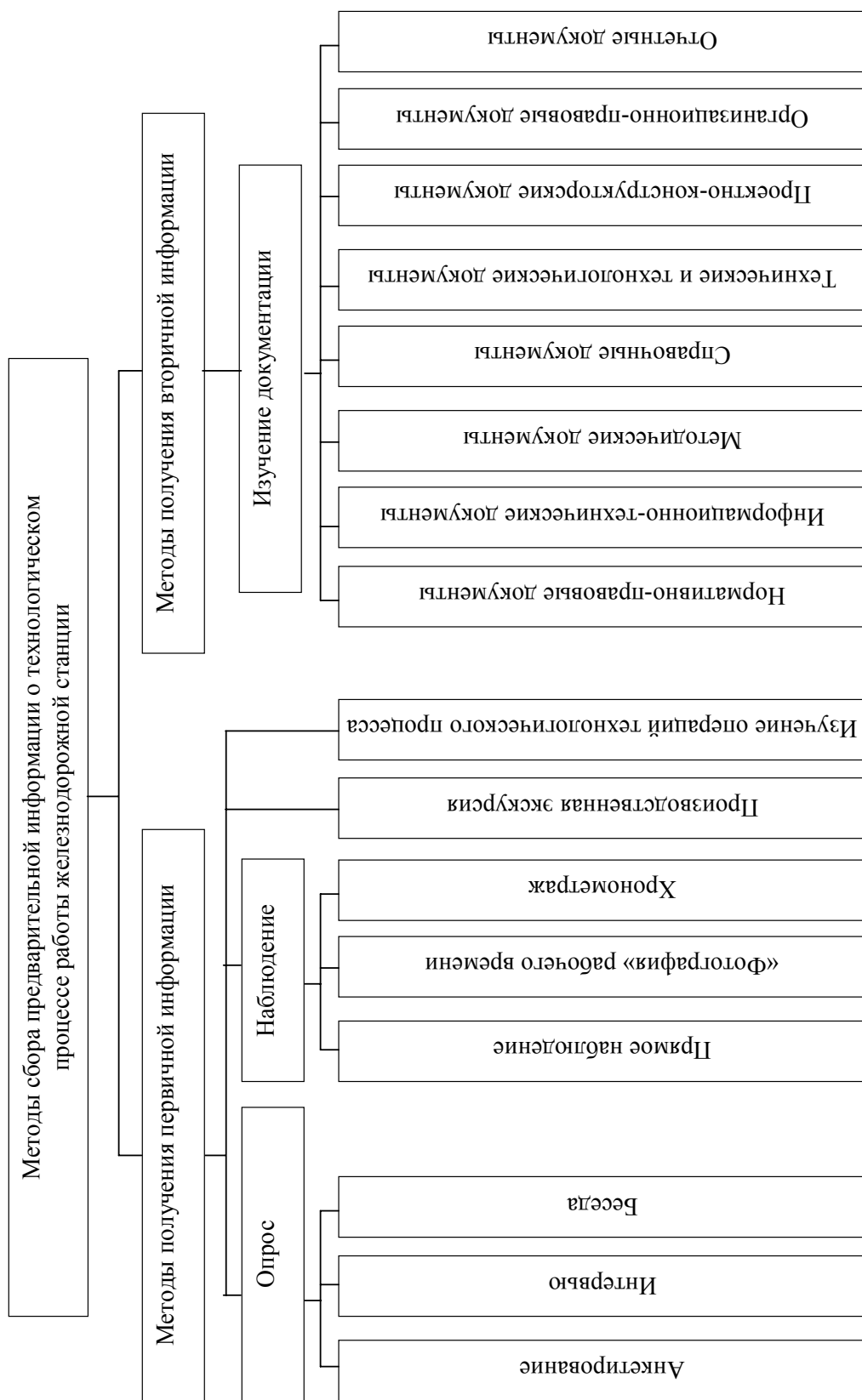


Рис. 4.1. Методы получения информации при обследовании станций

Учитывая структуру разработанной эргатической ФМС (см. гл. 2), для ее построения при выполнении обследования станции необходимо:

- выполнить анализ конструкции и технического оснащения станции, в т. ч. конструкции путевого развития, технической оснащенности подходов, системы станционной автоматики и технологии ее функционирования;

- исследовать структуру и параметры входящего потока заявок (поездов, составов, маневровых подач);

- установить структуру и параметры системы обслуживания заявок на станции, в т. ч. порядок выполнения технологических операций с разными категориями заявок, интенсивность обслуживания заявок, параметры каналов обслуживания;

- исследовать систему оперативного управления работой станции, в т. ч. обследовать рабочее место соответствующего ОДП (например, дежурного по станции), изучить порядок его действий при управлении работой станции.

При построении эргатических моделей железнодорожных станций может быть рекомендован следующий порядок выполнения обследования:

- 1) изучение технической документации: технологического процесса, технико-распорядительного акта станции, схемы путевого развития в целях получения общего представления о техническом оснащении и характере работы объекта;

- 2) анализ плана станции для определения геометрических параметров ее отдельных элементов, установление технических параметров примыкающих к станции перегонов, идентификация модели путевого развития станции, создание соответствующего файла данных (см. п. 2.2);

- 3) исследование функционирования системы станционной автоматики, изучение порядка управления стрелками и сигналами, идентификация модели системы управления перемещениями, создание соответствующего файла данных (см. п. 2.3);

- 4) исследование технологии обслуживания заявок различной категории, а также изучение порядка действий ДСП при оперативном управлении работой станции, построение соответствующих конечных автоматов для модели технологического процесса и представление их в виде файла данных (см. п. 2.4);

5) изучение и статистическая обработка документов станционной отчетности (например, графиков исполненного движения, архива станционной АСУ) для определения параметров входящего потока поездов и системы их обслуживания, а также для оценки характера и объемов работы станции (см. п. 2.7);

6) хронометраж продолжительности выполнения отдельных технологических операций с поездами и составами, а также последующая статистическая обработка полученных результатов (см. п. 2.4);

7) исследование рабочего места ДСП, разработка и построение соответствующей информационной модели (см. п. 2.5).

В соответствии с указанным порядком было выполнено обследование одной из крупных сортировочных станций Украины, результаты которого стали основой для построения и идентификации эргатической функциональной модели ее подсистемы расформирования.

4.2. Анализ технического оснащения станции и его формализация

Формализация путевого развития станции. В качестве примера авторами была разработана эргатическая функциональная модель подсистемы расформирования четной системы сортировочной станции *Н*. Схема парка приема (ПП) указанной станции (парк *А*) приведена на рис. 2.15. Путьевое развитие парка приема *А* включает 5 путей для приема поездов, следующих в расформирование, и 2 главных пути для пропуска пассажирских и грузовых транзитных поездов. Типичный путь № 7 обеспечивает заезд горочного локомотива под состав при его расформировании. К станции примыкает 2 подхода из *Д* и *Ю*. В правой части парка *А* расположена механизированная сортировочная горка средней мощности, на которой осуществляется роспуск составов прибывших поездов.

На основе анализа схемы (см. рис. 2.15) и плана парка *А* с учетом характеристики примыкающих перегонов была выполнена формализация их конструкции и построена соответствующая модель путевого развития (см. п. 2.2). С этой целью схема парка с примыкающими подходами была представлена в виде взвешенного ориентированного графа $G(V, E)$, в котором в качестве вершин были выделены центры

стрелочных переводов (подмножество вершин V^S), светофоры (подмножество V^C), и изолированные стыки (подмножество V^Z), а в качестве дуг – путевые участки между отдельными вершинами. С учетом технических характеристик элементов путевого развития были определены параметры отдельных вершин орграфа (см. п. 2.2.3). Длины путевых участков были определены по плану ПП и примыкающих перегонов. Орграф G , соответствующий схеме путевого развития парка, изображен на рис. 4.2. Данный орграф в ЭВМ представлен в виде списка дуг. Текст соответствующего файла данных приведен в приложении А.1.

Формализация системы станционной автоматики. Для построения МСУП парка приема A (см. п. 2.3.) был выполнен анализ функционирования устройств станционной автоматики и телемеханики. В соответствии с разработанной методикой был построен ориентированный граф $D(V, E)$, отображающий топологические связи элементов системы станционной автоматики. Во множестве вершин орграфа были выделены стрелочные переводы (подмножество V^S) и светофоры (подмножество V^C), а также определены их параметры (2.3), (2.4). Кроме того, установлено положение изолирующих стыков, что позволило на схеме парка выделить изолированные путевые и стрелочные секции и определить их параметры (2.5). На рис. 4.3 представлена схема ПП с подходами, на которой указаны структурные элементы МСУП. Схема, приведенная на рис. 4.3, и отображающий ее орграф D представляются в ЭВМ списками инцидентности его вершин, которые дополняются списками технических параметров, характеризующих элементы станции и их функциональные связи в системе станционной автоматики. Текст соответствующего файла данных приведен в приложении А.2.

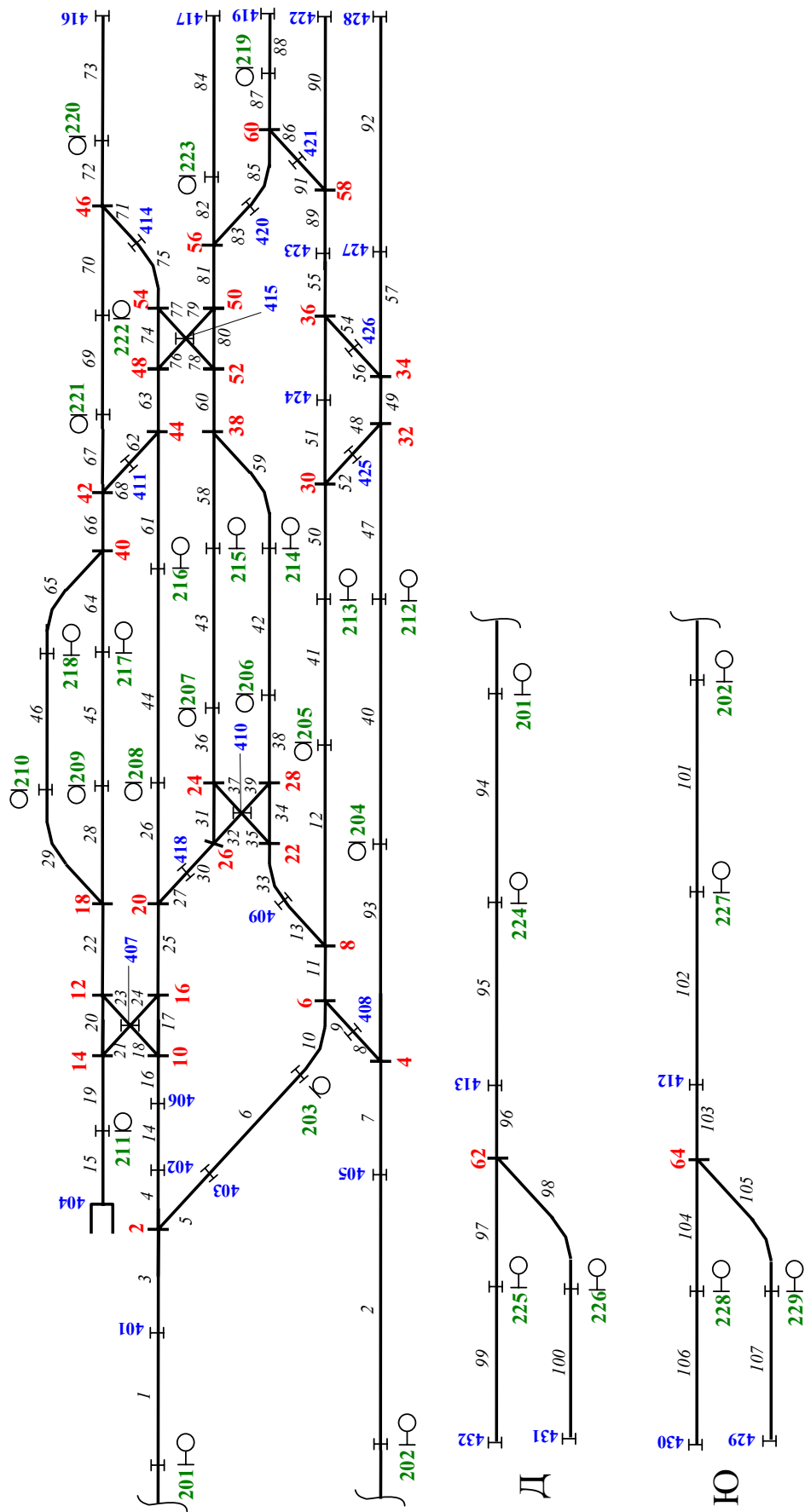


Рис. 4.2 Формализация путевого развития парка приема А сортировочной станции и подходов к нему

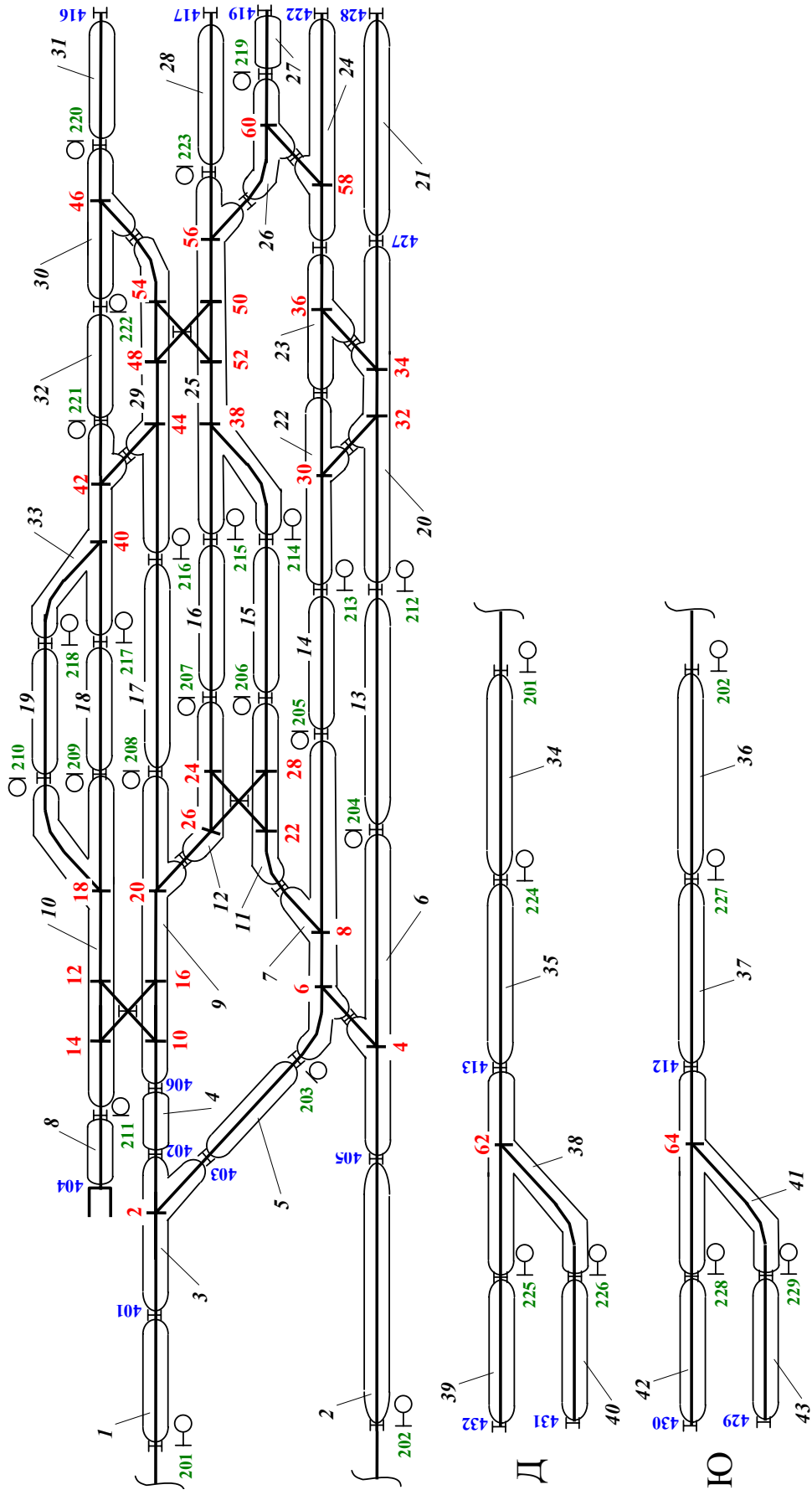


Рис. 4.3. Формализация системы станционной автоматики для парка приема А

4.3. Определение параметров входящего потока заявок

4.3.1. Анализ интенсивности входящего потока заявок

Параметры входящего потока для парка приема A станции H были определены на основе анализа графиков исполненного движения, по которым установлены категория и момент прибытия каждого поезда (см. приложение Б.1). Интенсивность поступления поездов на станцию характеризуется средней величиной интервала между прибывающими поездами. Интервал прибытия I представляет собой случайную величину с некоторым законом распределения. При определении параметров входящего потока поездов была выдвинута гипотеза о том, что случайные величины интервалов между поездами, прибывающими из D и из $Ю$, распределены по усеченному закону Эрланга. В результате статистической обработки выборок значений интервалов по двум направлениям (см. приложение Б.2) были определены параметры распределения: минимальный интервал прибытия I_{\min} , математическое ожидание интервала $M[I]$, дисперсия $D[I]$, среднее квадратическое отклонение $\sigma[I]$, коэффициент вариации $v_{\text{вх}}$ и параметр Эрланга K .

Результаты статистической обработки интервалов прибытия поездов всех категорий с направлений D и $Ю$ в парк A приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характеристика входящего потока для парка приема A

Направление прибытия	Параметры распределения				
	I_{\min} , мин	$M[I^*]$, мин	$\sigma[I]$, мин	$v_{\text{вх}}$	K
D	3	14,8	13,8	0,93	1
$Ю$	5	39,2	32,5	0,83	1

В таблице приведено значение математического ожидания интервала I^* , которое связано с его действительным значением как

$$I^* = I - I_{\min} .$$

Гистограммы распределения случайной величины интервалов приведены на рис. 4.4.

Как показывает анализ результатов статистических данных (см. табл. 4.1), случайные величины интервалов прибытия I^* распределены по усеченному закону Эрланга с параметром $k=1$ (экспоненциальное распределение).

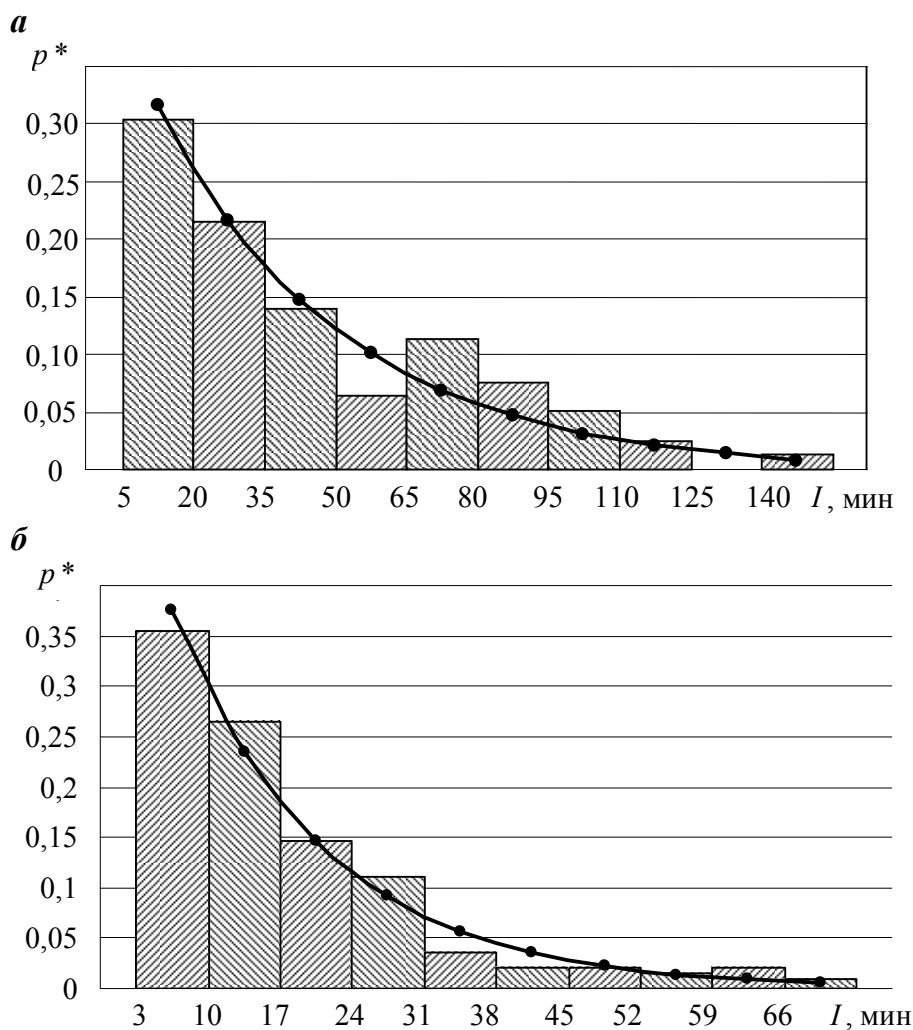


Рис. 4.4. Гистограмма распределения случайной величины интервала:
 а – I_D прибытие поездов из Д; б – $I_{Ю}$ прибытие поездов из Ю

Проверка данной гипотезы была выполнена с помощью критерия Пирсона χ^2 (см. приложение Б.2). Сравнение вычисленных значений χ^2 с соответствующими критическими значениями показало, что выдвинутая гипотеза не противоречит опытными данным (для похода Д

$\chi^2 = 8,13$; для похода Ю – $\chi^2 = 7,95$, тогда как при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\nu = 7$ табличное значение $\chi_{7;0,05}^2 = 14,07$ [106], т. е. $\chi^2 < \chi_{\text{табл}}^2$).

Частоты появления поездов отдельных категорий во входящих потоках поездов каждого направления приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Распределение потоков поездов по категориям

Направление прибытия	Частота появления P^* по категориям поезда:		
	в расформирование	транзитный	пассажирский
Д	0,207	0,318	0,475
Ю	0,284	0,518	0,198

4.3.2. Определение параметров прибывающих составов

Для определения параметров составов, необходимых для моделирования входящего потока, был выполнен анализ размеченных ТГНЛ 200 составов, которые были расформированы в четной системе станции Н. В результате анализа был получен статистический ряд распределения случайного числа вагонов m в составе и его параметры (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Распределение случайного числа вагонов в расформируемом составе при $M[m] = 46,25$ ваг., $D[m] = 155,94$ ваг.², $S[m] = 12,49$ ваг.

m_i	$m_{\text{ср}i}$	n_i	p_i^*	m_i	$m_{\text{ср}i}$	n_i	p_i^*
12–16	14	4	0,020	37–41	39	16	0,080
17–21	19	8	0,040	42–46	44	14	0,070
22–26	24	7	0,035	47–51	49	26	0,130
27–31	29	16	0,080	52–56	54	57	0,285
32–36	34	10	0,050	57–61	59	42	0,210
				Всего		200	1,000

Гистограмма распределения случайного числа вагонов в составе m приведена на рис. 4.5.

Как видно из приведенных данных, наиболее вероятное значение числа вагонов в составе составляет 52...56; в то же время достаточно большое число прибывающих составов имеют незначительную длину, так что математическое ожидание составляет $M[m] = 46,25$ вагона.

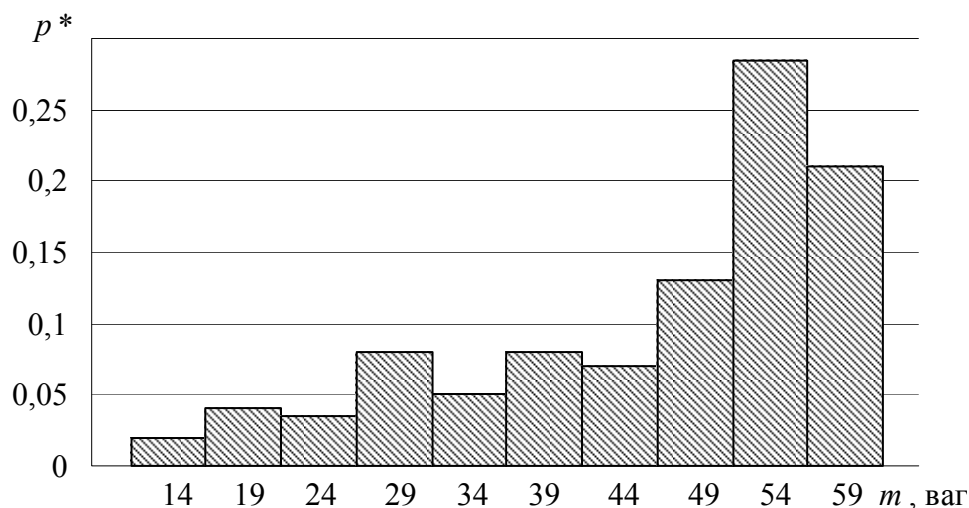


Рис. 4.5. Распределение случайного числа вагонов в составе m

Распределение случайного числа вагонов в отцепе N приведено в табл. 4.4. Гистограмма распределения случайного числа вагонов в отцепе N приведена на рис. 4.6.

Полученные результаты показывают, что на данной горке случайное число вагонов в отцепе имеет распределение, близкое к геометрическому, что характерно для большинства сортировочных горок [55, 68, 74]. При этом следует отметить высокую вероятность (0,56) появления одновагонных отцепов.

Для моделирования составов поездов, прибывающих в расформирование, необходимо прежде всего определить тип каждого вагона (см. п. 2.7). С этой целью была найдена частота появления в составах вагонов каждого типа, которая составляет для крытых вагонов — 0,086, для полувагонов — 0,512, для платформ — 0,013, для цистерн — 0,038, для прочих — 0,351. Соответствующая гистограмма распределения представлена на рис. 4.7.

Для моделирования массы вагона необходимо определить его весовую категорию. Частота появления вагонов каждой категории была

определена по данным статистической обработки натуральных листов прибывающих поездов (табл. 4.5).

Таблица 4.4

**Распределение случайного числа вагонов в отцепе
при $M[N] = 2,56$ ваг., $D[N] = 9,21$ ваг.², $S[N] = 3,03$ ваг.**

Ni	ni	pi*	Ni	ni	pi*
1	1994	0,5582	11	25	0,0070
2	618	0,1730	12	17	0,0048
3	278	0,0778	13	12	0,0034
4	186	0,0521	14	6	0,0017
5	114	0,0319	15	9	0,0025
6	88	0,0246	16	6	0,0017
7	57	0,0160	17	9	0,0025
8	50	0,0140	18	6	0,0017
9	34	0,0095	19	6	0,0017
10	34	0,0095	20	23	0,0064
			Всего	3572	1,0000

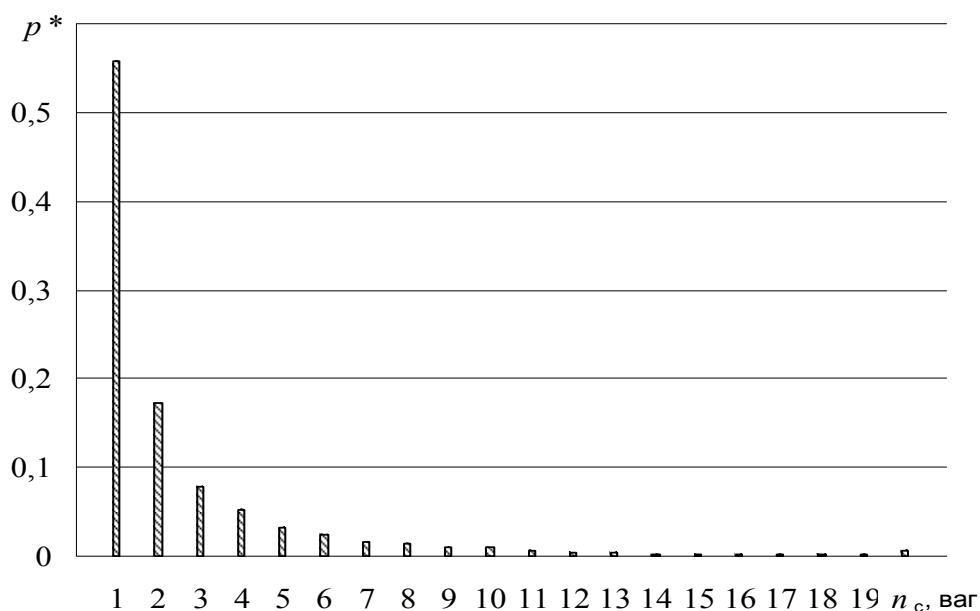


Рис. 4.6. Распределение случайного числа вагонов в отцепе

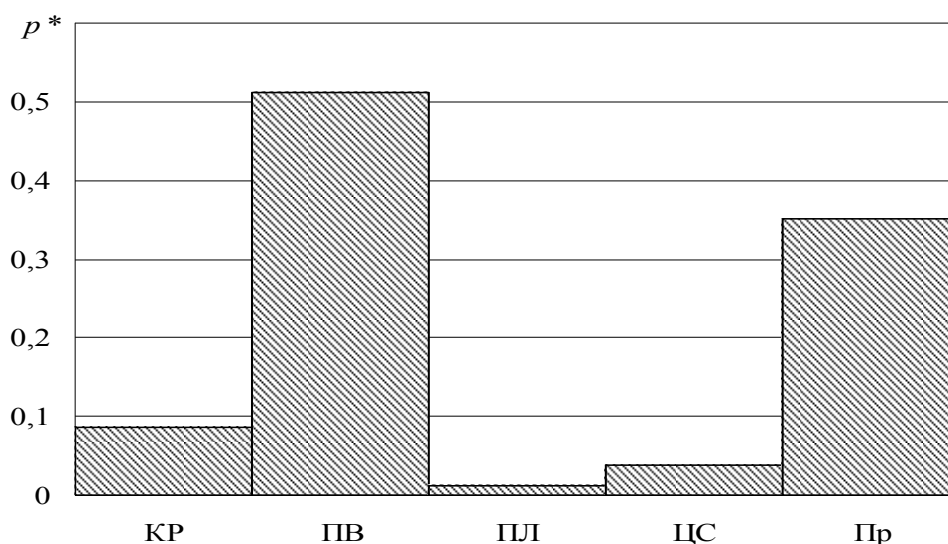


Рис. 4.7. Распределение вагонов по типу

Таблица 4.5

Распределение загрузки вагонов разного типа

Тип вагона	Масса груза, т					
	0	0–12	12–24	24–36	36–48	60
КР	0,499	0,042	0,075	0,040	0,054	0,290
ПВ	0,480	0,012	0,005	0,020	0,099	0,384
ПЛ	0,689	0,025	0,059	0,168	0,034	0,025
ЦС	0,619	0,000	0,000	0,000	0,045	0,335
Пр	0,610	0,036	0,025	0,040	0,036	0,252
Среднее	0,535	0,023	0,019	0,030	0,070	0,323

Распределение загрузки вагонов в среднем для всех типов вагонов приведено в последней строке табл. 4.5 и на рис. 4.8.

Как видно из приведенных данных, в потоке перерабатываемых вагонов преобладают порожние вагоны (53,5 %); среди груженых большинство составляют полногрузные вагоны массой 60 т (32,3 %).

Для моделирования назначений вагонов на основе статистической обработки размеченных ТГНЛ была получена матрица условных вероятностей следования вагонов состава на 14 возможных назначений (см. п. 2.7); фрагмент матрицы приведен в табл. 4.6.

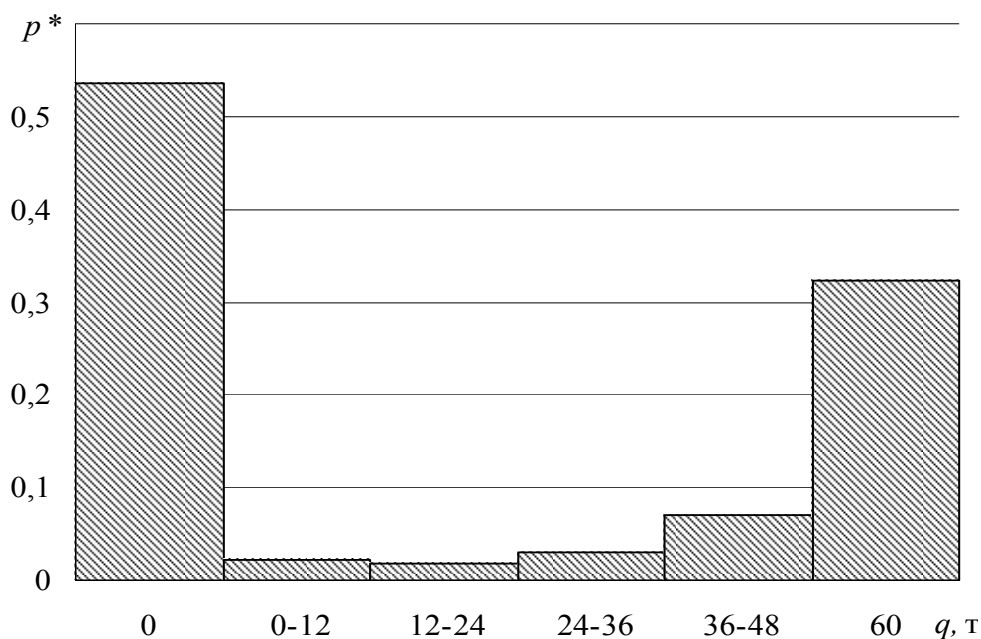


Рис. 4.8. Распределение вагонов по уровню загрузки

Таблица 4.6

Матрица условных вероятностей назначений вагонов состава

		НАЗНАЧЕНИЯ							
		1	2	3	...	11	12	13	14
I-й ваг		0,0000	0,0000	0,1650	...	0,0550	0,0400	0,0150	0,1950
НАЗНАЧЕНИЯ	1	0,1600	0,0000	...		0,0800	0,0000	0,0000	0,0400
	2	0,0081	0,4634	...		0,0244	0,0244	0,0081	0,1545
	3	0,0022	0,0080	...		0,0088	0,0146	0,0007	0,0795

	11	0,0061	0,0123	...		0,6227	0,0092	0,0000	0,0828
	12	0,0000	0,0113	...		0,0169	0,6271	0,0000	0,0565
	13	0,0000	0,0000	...		0,0051	0,0000	0,6548	0,0609
	14	0,0035	0,0099	...		0,0192	0,0064	0,0076	0,6037

В первой строке матрицы приведены вероятности следования первого вагона состава на назначения 1...14, которые существуют в четной системе сортировочной станции *H*. В остальных строках

с номерами $i=1..14$ приведены условные вероятности следования вагона на j -е назначение (j – номер назначения столбца), определенные при условии, что предыдущий вагон следует на i -е назначение. В полученной матрице выделены диагональные элементы, которые характеризуют вероятности появления длинных отцепов с числом вагонов более 1, следующих на соответствующее назначение. Как видно из приведенной матрицы, значения диагональных элементов существенно превышают остальные, что согласуется с распределением количества вагонов в отцепе и, следовательно, отвечает характеру потока отцепов на четной горке станции H .

4.4. Определение параметров системы обслуживания

ФМС в процессе моделирования должна имитировать реальный технологический процесс обработки поездов и маневровых передач как по структуре, так и по продолжительности выполнения отдельных операций. При этом необходимо учитывать, что продолжительность выполнения каждой операции является случайной величиной с некоторым законом распределения. Для получения характеристик законов распределения случайных величин продолжительности обслуживания был выполнен хронометраж процесса обработки 30 поездов. При этом фиксировались следующие данные: номер поезда, количество вагонов в поезде $N_{\text{ваг}}$, продолжительность закрепления $T_{\text{закр}}$, продолжительность осмотра состава $T_{\text{то}}$, продолжительность уборки башмаков $T_{\text{уб}}$, продолжительность роспуска $T_{\text{р}}$, продолжительность обработки документов $T_{\text{док}}$, продолжительность корректировки документов $T_{\text{кор}}$. Данные хронометража приведены в приложении В.1. Следует отметить, что случайные величины $T_{\text{закр}}$, $T_{\text{то}}$, $T_{\text{уб}}$, $T_{\text{р}}$ не являются независимыми, так как продолжительность выполнения соответствующих технологических операций зависит от параметров обслуживаемых составов (числа вагонов $N_{\text{ваг}}$), т. е. $T = f(N_{\text{ваг}})$. О наличии указанной зависимости свидетельствуют

поля точек и значения коэффициентов корреляции r указанных величин с числом вагонов $N_{\text{ваг}}$ в составе (рис. 4.9).

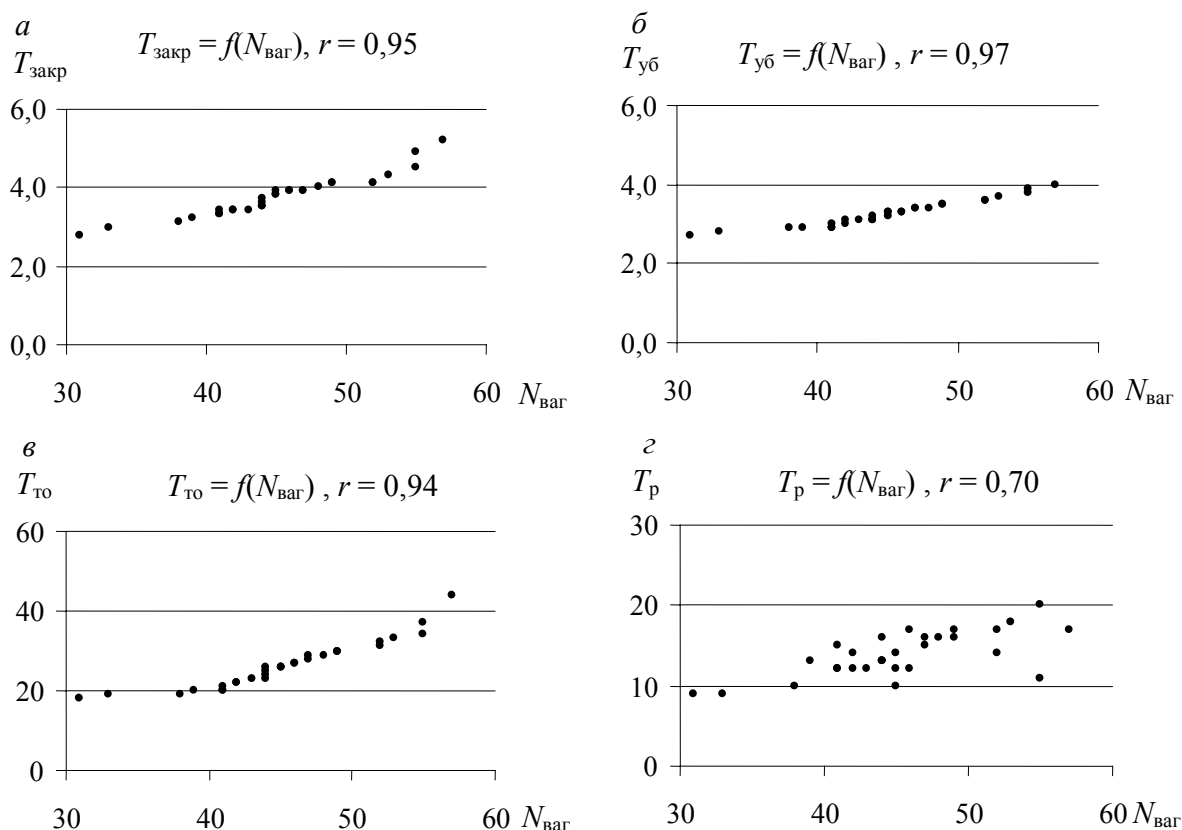


Рис. 4.9. Зависимости продолжительности операций от числа вагонов в составе: a – закрепление состава; $б$ – технический и коммерческий осмотр; $в$ – уборка башмаков; $з$ – надвиг и роспуск состава

Указанные зависимости для каждой из рассматриваемых случайных величин были получены с помощью регрессионного анализа:

- модель μ_1 $T_{\text{закр}} = \frac{1}{0,54034 - 0,00596N_{\text{ваг}}}$;
- модель μ_2 $T_{\text{то}} = \frac{1}{0,09982 - 0,00133N_{\text{ваг}}}$;
- модель μ_3 $T_{\text{уб}} = \frac{1}{1 - e^{(0,00717N_{\text{ваг}} - 0,69523)}}$;
- модель μ_4 $T_{\text{п}} = 14,23423N_{\text{ваг}} - 40,30825$.

В то же время, как видно из рис. 4.10, случайные величины $T_{\text{док}}$ и $T_{\text{кор}}$ практически не зависят от числа вагонов в составе поезда, а соответствующие коэффициенты корреляции близки к нулю.

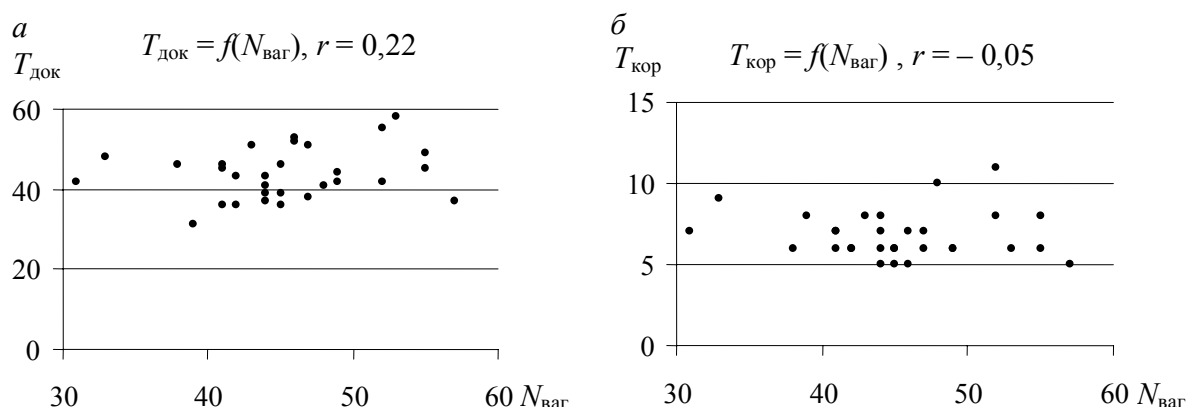


Рис. 4.10. Зависимости продолжительности операций от числа вагонов в составе:

а – обработка документов; *б* – корректирование информации о составе

В этой связи значения $T_{\text{док}}$ и $T_{\text{кор}}$ могут моделироваться как случайные величины с определенным законом распределения и параметрами; с этой целью была выполнена статистическая обработка данных, полученных в результате натуральных наблюдений. Для каждой случайной величины построен статистический ряд, получены значения параметров распределения и выполнена проверка гипотезы о законе распределения (см. приложение В.2). Результаты расчетов приведены в табл. 4.7. Сравнение вычисленных значений χ^2 с соответствующими критическими значениями показало, что принятые гипотезы о распределении случайных величин не противоречат опытными данным.

Таблица 4.7

Результаты статистической обработки данных натуральных наблюдений

Показатель	\bar{x} , мин	$D[X]$, мин ²	$\sigma[X]$, мин	Закон распределения	χ^2
Продолжительность обработки документов, мин	43,83	36,56	6,05	Логнормальный	2,37
Продолжительность корректировки документов, мин	6,30	2,03	1,42	Логнормальный	3,82

Полученные модели $\mu_1 \dots \mu_4$ и законы распределения используются в процессе моделирования при определении продолжительности выполнения соответствующих технологических операций (см. табл. 2.1).

В разработанной ФМС технологический процесс обслуживания поездов на станции формализован на основе детерминированных конечных автоматов (см. п. 2.4.4). При этом на этапе идентификации ФМС для каждого типа объектов разрабатывается отдельный КА. Каждый автомат представляется в ЭВМ в виде орграфа выходов и переходов. Порядок построения подобных графов переходов КА рассмотрен на примере формализации технологического процесса обслуживания поездов, прибывших в расформирование (см. п. 2.4.5). Для автоматизации построения таких графов переходов разработан специальный графический редактор (см. п. 3.3).

4.5. Оценка адекватности модели

Для оценки адекватности разработанной модели был выполнен статистический анализ случайных величин времени нахождения расформируемых составов в парке приема A , полученных на реальной станции и методом моделирования. С этой целью исследованы выборки указанных значений времени, полученных в результате наблюдений на станции $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_x})$, $n_x = 70$ и в результате моделирования работы парка $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_{n_y})$, $n_y = 50$.

По данным выборок определены статистические оценки математических ожиданий \bar{x} и \bar{y} и средних квадратических отклонений s_x и s_y , а также выполнена проверка гипотез о законе распределения случайных величин X и Y . С этой целью была выдвинута гипотеза H_x о том, что случайная величина X имеет логарифмически-нормальное распределение ($H: F_X(x) = \Phi(\ln x; \mu; \sigma^2)$, $x \geq 0$). Здесь $\Phi(z; \mu; \sigma^2)$ – функция нормального распределения случайной величины $z = \ln x$ с параметрами μ и σ^2 .

Для проверки гипотезы H_x использовался критерий согласия χ^2 , вычисленный по данным выборки $(x_1, x_2, \dots, x_{n_x})$, статистический ряд распределения которой приведен в табл. 4.8; отдельные значения p_i в данной таблице определялись как

$$p_i = \Phi\left(\frac{\ln x_i - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\ln x_{i-1} - \mu}{\sigma}\right), \quad (4.1)$$

где $\mu = \ln \bar{x} = 4,32$ и $\sigma = \sigma_{\ln x} = 0,044$.

Таблица 4.8

Расчет χ^2 для выборки значений случайной величины X

Интервал x , мин	m	p	np	Параметры
10,0–45,0	6	0,101	7,10	$x_{\min} = 28,0$ мин $x_{\max} = 189,0$ мин $\bar{x} = 82,5$ мин $\sigma_x = 35,285$ мин $\chi^2 = 1,03$
45,0–80,0	34	0,450	31,53	
80,0–115,0	18	0,293	20,54	
115,0–150,0	9	0,107	7,48	
150,0–185,0	2	0,033	2,33	
185,0–220,0	1	0,015	1,02	

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\nu = (6 - 1) - 2 = 3$ квантиль $\chi_{3;0,95}^2 = 7,80$ [106]; так как по опытным данным (см. табл. 4.8) $\chi_x^2 = 1,03 < 7,80$, результаты наблюдений не противоречат основной гипотезе H_x . Таким образом, можно признать, что случайная величина X подчинена логарифмически-нормальному закону распределения. Гистограмма и кривая плотности логарифмически-нормального распределения случайной величины X приведены на рис. 4.11.

Такая же гипотеза H_y была выдвинута о распределении случайной величины Y . Для анализа использовалась выборка значений $(y_1, y_2, \dots, y_{n_y})$, полученных в результате моделирования суточной работы парка приема; объем выборки $n_y = 50$. Результаты расчета

статистических параметров распределения, а также критерия χ_y^2 приведены в табл. 4.9.

Значения p_i в табл. 4.9 вычислялись с помощью выражения (4.1) при $\mu = \ln \bar{y} = 4,40$ и $\sigma = \sigma_{\ln y} = 0,32$.

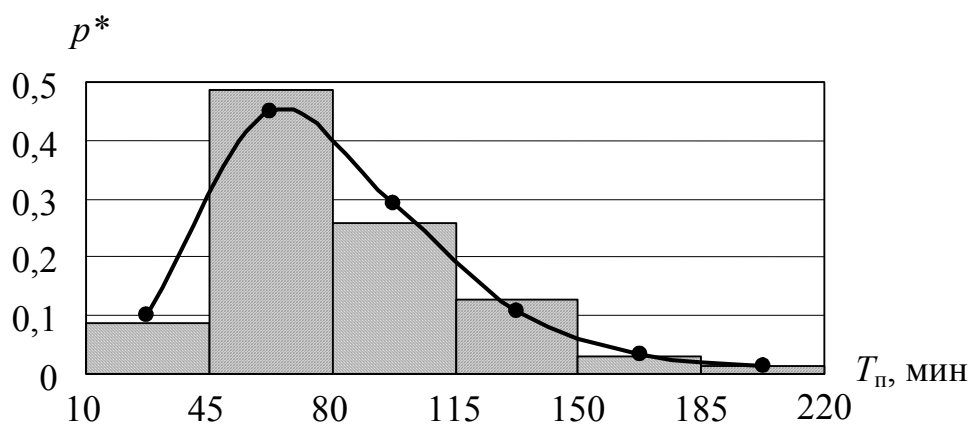


Рис. 4.11. Распределение случайной величины X простоя поезда в парке приема (натурные данные)

Таблица 4.9

Расчет χ^2 для выборки значений случайной величины Y

Интервал y , мин	t	p	np	Параметры $y_{\min} = 57,0$ мин $y_{\max} = 191,0$ мин $\bar{y} = 85,8$ мин $\sigma_y = 30,779$ мин $\chi^2 = 6,30$
45,0–65,0	13	0,266	13,32	
65,0–85,0	19	0,292	14,61	
85,0–105,0	7	0,216	10,81	
105,0–125,0	4	0,121	6,03	
125,0–145,0	5	0,058	2,92	
145,0–165,0	1	0,026	1,31	
165,0–185,0	0	0,011	0,57	
185,0–205,0	1	0,008	0,42	

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\nu = (8 - 1) - 2 = 5$ квантиль $\chi_{5;0,95}^2 = 11,10$ [106]; так как вычисленное по данным моделирования (см. табл. 4.9) значение $\chi_y^2 = 6,30 < 11,10$,

результаты моделирования $(y_1, y_2, \dots, y_{n_y})$, не противоречат основной гипотезе H_y . Следовательно, можно утверждать, что случайная величина времени нахождения составов в парке прибытия Y , полученная по результатам моделирования, также распределена по логарифмически-нормальному закону. Гистограмма и кривая плотности логарифмически-нормального распределения для случайной величины Y приведены на рис. 4.12.

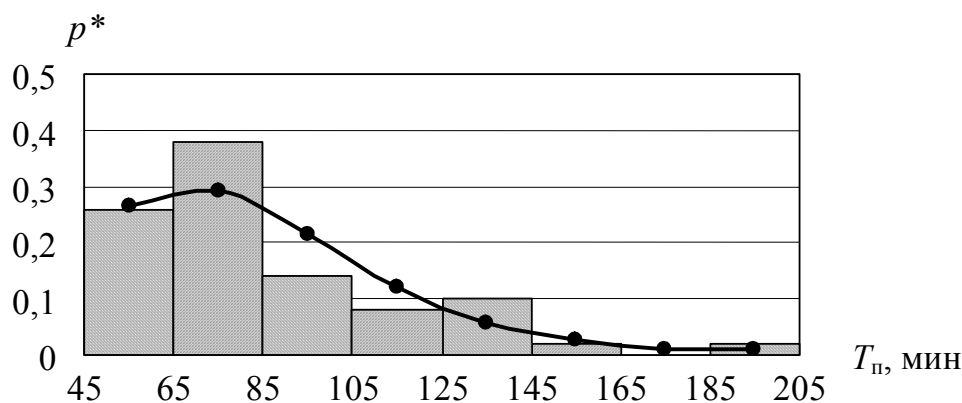


Рис. 4.12. Распределение случайной величины Y простоя поездов в парке приема (результаты моделирования)

Таким образом, в результате статистического анализа установлено, что случайные величины X и Y подчиняются логарифмически-нормальному закону; распределения имеют весьма близкие параметры: для станции и для модели оценки математического ожидания соответственно равны $\bar{x} = 82,50$ мин и $\bar{y} = 85,80$ мин; оценки среднего квадратического отклонения – $s_x = 35,285$ мин, $s_y = 30,779$ мин. Полученные статистические параметры свидетельствуют о близости результатов моделирования опытными данными.

Для повышения достоверности утверждения об адекватности модели по данным указанных выборок была выполнена проверка гипотезы об их принадлежности к одной и той же генеральной совокупности. С этой целью был использован U -критерий Уилкоксона [107], который предназначен для проверки гипотезы H о том, что функции распределения F_X и F_Y двух генеральных совокупностей одинаковы ($H: F_X = F_Y$); конкурирующая гипотеза $H_1: F_X \neq F_Y$. Значения критерии Уилкоксона определяются с помощью выражений

$$u_X = R_X - \frac{n_X(n_X + 1)}{2}, \quad u_Y = R_Y - \frac{n_Y(n_Y + 1)}{2},$$

где R_X, R_Y – сумма рангов, которые соответствуют элементам выборок $x_i (i=1, \dots, n_x)$ и $y_j (j=1, \dots, n_y)$.

Ранги r_i и r_j представляют собой номера элементов обоих выборок, которые отсортированы в порядке возрастания ($r \in [1, n_x + n_y]$). В результате расчета указанных статистик для выборок x_i и y_j получены значения $R_X = 4\,008$, $u_X = 1\,523$ и $R_Y = 3\,252$, $u_Y = 1\,977$.

При проверке гипотезы $H: F_X = F_Y$ против конкурирующей гипотезы $H_1: F_X \neq F_Y$ принимается двусторонняя критическая область; при этом гипотеза H отвергается, если $\min(u_X, u_Y) < U_{n_X, n_Y, \alpha}$. При больших значениях $n = n_x + n_y$ приближенное значения критического значения $U_{n_X, n_Y, \alpha}$ можно определить как

$$U_{n_X, n_Y, \alpha} \approx \frac{1}{2} n_X n_Y - \lambda_q \sqrt{\frac{1}{12} n_X n_Y (n_X + n_Y + 1)},$$

где λ_q – квантиль порядка q нормального распределения $N(0,1)$.

Квантиль q определяется по принятому уровню значимости

$$q = 1 - \frac{\alpha}{2},$$

где α – уровень значимости (принято $\alpha = 0,05$).

Для рассматриваемых выборок x_i и y_j $n = 70 + 50 = 120$, $\lambda_{0,975} = 1,960$, $U_{n_X, n_Y, \alpha} = 1\,381,80$. Так как $\min(u_X, u_Y) = 1\,523 > 1\,381,80$, основная гипотеза H о принадлежности выборок x_i и y_j одной генеральной совокупности не противоречит экспериментальным данным и может быть принята.

Таким образом, можно заключить, что разработанная эргатическая модель парка приема адекватна и может быть использована для дальнейших исследований работы реальной станции.

Методика

технико-эксплуатационной оценки станций на основе функционального моделирования

5.1. Проблемы технико-экономического управления на железнодорожном транспорте

В современных рыночных условиях предъявляются новые требования к качеству работы железнодорожных станций Украины. Так, одним из основных факторов обеспечения высокой эффективности эксплуатационной работы железных дорог является минимизация времени нахождения вагонов на станциях. С этой целью, с одной стороны, станции должны обладать достаточным резервом пропускной и перерабатывающей способности для погашения пиковых нагрузок; с другой – необходимо минимизировать собственные расходы станций, сокращая избыточный технический потенциал. В этой связи особую актуальность приобретает проблема эффективного технико-экономического управления станциями, основная задача которого – принимать экономически обоснованные решения как при оперативном управлении, так и при планировании организационно-технических мероприятий (ОТМ), направленных на повышение эффективности работы станций. Для решения данной проблемы необходима достоверная количественная оценка ОТМ, планируемых на станциях.

В последнее время для решения задач технико-экономического управления на железнодорожном транспорте разрабатываются и внедряются современные системы поддержки принятия решений (СППР), которые на основе анализа имеющейся информации об объекте управления (станции, диспетчерском участке и т. д.) предлагают рациональный (в большинстве случаев наиболее экономически выгодный) вариант действий по управлению данным объектом [108–112]. Одной из основных проблем, возникающих при разработке

такого рода систем, является прогнозирование технико-эксплуатационных показателей функционирования объекта при реализации того или иного управленческого решения. Так, в работах [108, 109] рассматривается методика построения СППР для оптимизации распределения материально-технических и финансовых ресурсов между подразделениями железнодорожной сети. При этом проблема прогнозирования результатов работы отдельных подразделений железной дороги решается с использованием аппарата нечеткой логики. При решении оптимизационных задач по эффективному распределению ограниченного ресурса СППР использует специальную базу данных, которая формируется на основе статистических данных о работе объектов железнодорожной сети [108].

Эффективным средством анализа и оценки показателей функционирования станций в различных условиях может служить имитационное моделирование станционных процессов на ЭВМ. В работах [110, 111] рассмотрены СППР, позволяющие прогнозировать работу железнодорожных станций в тех или иных условиях и на основании этого принимать обоснованные решения по управлению их функционированием. В основе каждой из предложенных СППР лежит имитационная модель станции, использующая при моделировании данные о технико-технологических параметрах станции, а также информацию о прогнозируемых условиях работы.

В этом аспекте заслуживает внимания опыт железных дорог Германии [112]. Здесь разработан моделирующий имитационный комплекс RailSys, который используется для оценки эффективности капиталовложений в развитие инфраструктуры железнодорожных станций и участков. В комплекс RailSys входят имитационные модели различных станций и участков железнодорожной сети. Каждая такая модель отражает техническое оснащение и технологию работы определенного объекта. Предусмотрены специальные средства редактирования моделей, которые позволяют вносить в них изменения в соответствии с ОТМ, планируемыми при модернизации станции или участка.

Как уже отмечалось, одна из основных проблем, возникающих при создании моделей железнодорожных станций, имитация действующих систем управления, основным звеном которых является человек-диспетчер. Очевидно, что без адекватного моделирования указанных систем невозможно получение достоверной количественной

оценки показателей функционирования станций. Вместе с тем, как показал анализ (см. гл. 1), в настоящее время не существует методик, позволяющих адекватно моделировать деятельность диспетчера, управляющего станцией. В этой связи при разработке СППР, предназначенных для исследования и оптимизации работы железнодорожных станций, целесообразно использовать эргатические модели, в функционировании которых человек принимает непосредственное участие, выполняя функции диспетчера. Такие модели наиболее точно учитывают бихевиоральные факторы, т. е. факторы, связанные с поведением человека, и позволяют в процессе моделирования имитировать процессы принятия управленческих решений.

Таким образом, одной из задач, которые могут решаться с помощью эргатических имитационных моделей железнодорожных станций, является исследование и технико-экономическая оценка различных ОТМ, направленных на совершенствование технического оснащения и технологии работы станций. Для этих целей с моделью после ее построения и идентификации выполняют серию экспериментов при различных вариантах конструкции путевого развития станции, ее технического оснащения и технологии работы. ФМС позволяет по результатам моделирования установить значения технико-эксплуатационных показателей, которые используются для анализа работы станции, а также для технико-экономического сравнения и выбора вариантов совершенствования конструкции и технологии ее работы.

5.2. Методика векторной оптимизации параметров станции

5.2.1. Постановка задачи

С помощью ФМС железнодорожной станции можно получить количественные значения параметров, характеризующих каждый из возможных вариантов ОТМ, направленных на совершенствование конструкции и технологии ее работы. Каждый вариант можно укрупненно охарактеризовать двумя интегральными показателями: количественным (например, затраты на реализацию варианта) и качествен-

ным (например, простой вагонов на станции; перерабатывающая способность станции). В большинстве случаев на реализацию комплекса ОТМ выделяется определенный лимит ресурсов (денежных, материальных, трудовых и т. д.). При этом возникает проблема выбора варианта, на который следует направить выделенные средства для получения максимального эффекта. Для решения указанной задачи разработана методика, основанная на принципах векторной оптимизации [78].

Следует отметить, что методы векторной оптимизации в настоящее время достаточно широко применяются при решении задач, связанных с определением рациональных вариантов организации работы объектов железнодорожного транспорта. Так, в работе [113] методами векторной оптимизации решается задача формирования вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине. В [114, 115] на основе векторной оптимизации разработаны методики определения дополнительных тарифных ставок за ускорение доставки грузов, позволяющие строить экономически обоснованные отношения между грузоотправителями и железной дорогой. В [116] этими методами предлагается определять рациональные параметры поездопотоков, а в [117] на основе векторной оптимизации рассчитываются рациональные параметры процесса доставки грузов железнодорожным транспортом. В фундаментальной работе [118] методы векторной оптимизации используются для структурного анализа транспортных систем. В указанной работе приведены постановка и решение целого комплекса задач, направленных на повышение эффективности функционирования железнодорожного транспорта, в т. ч. анализ и прогнозирование деятельности железных дорог, определение рациональной мощности локомотива на участке, планирование реконструкционных мероприятий на участках железной дороги для сокращения времени движения поездов.

При формализации задачи векторной оптимизации станция или ее отдельная подсистема рассматривается как сложная система, состоящая из множества элементов, к которым можно отнести путевое развитие, систему обслуживания, систему управления и др. Комплекс мероприятий γ_i , направленных на повышение эффективности функционирования станции, в общем случае предусматривает проведение работ на каждом таком элементе:

$$\gamma_i = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \Theta_n\}, \quad (5.1)$$

где Θ_j – множество возможных мероприятий на j -м элементе станции (реконструкция горловин; изменение числа путей, количества исполнителей технологических операций и др.);

n – общее количество элементов станции, для которых планируется модернизация.

На реализацию каждого из мероприятий Θ_{ij} комплекса γ_i требуются определенные затраты средств $Z(\Theta_{ij})$. С другой стороны, реализация мероприятия Θ_{ij} позволяет получить определенное значение показателя его эффективности $\Psi(\Theta_{ij})$. Конкретные значения указанных показателей могут быть определены по результатам моделирования работы станции. Таким образом, суммарные затраты средств по соответствующему варианту γ_i определяются как

$$\left. \begin{aligned} Z(\gamma_i) &= \sum Z(\Theta_{ij}), \\ \Theta_{ij} &\in \gamma_i. \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

Значение показателя эффективности каждого варианта составит:

$$\left. \begin{aligned} \Psi(\gamma_i) &= \sum \Psi(\Theta_{ij}), \\ \Theta_{ij} &\in \gamma_i. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Набор возможных вариантов составляет множество $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k\}$. Решением задачи является такое подмножество $\Gamma^* = \{\gamma_1^*, \gamma_2^*, \dots, \gamma_m^*\}$, для каждого из элементов которого выполняется условие

$$\left(\begin{array}{c} Z(\gamma^*) \\ \Psi(\gamma^*) \end{array} \right) \rightarrow \min. \quad (5.4)$$

Указанная задача в изложенной постановке является задачей векторной оптимизации и может быть решена с помощью метода неоп-

ределенных множителей Лагранжа [118, 119]. Результатом решения является подмножество точек, каждая из которых при заданной величине затрат $Z(\gamma^*)$ определяет рациональный комплекс мероприятий γ^* . При этом полученное подмножество точек Γ^* включает лишь так называемые эффективные решения, каждое из которых предусматривает улучшение значения качественного показателя при увеличении затрат.

При постановке задачи определения рационального комплекса мероприятий, направленных на совершенствование конструкции и технологии работы железнодорожной станции, каждый вариант планируемых ОТМ может быть оценен по двум показателям: $Z(\gamma_i)$ – дополнительные годовые приведенные (модифицированные) затраты $\Delta\Pi_i$ при реализации данного комплекса мероприятий, тыс. у. е./год; $\Psi(\gamma_i)$ – увеличение перерабатывающей способности станции (ее отдельного парка) ΔN_i , которое может быть достигнуто при реализации варианта γ_i , вагонов/сутки. При этом задача (5.4) представляется в виде:

$$\begin{pmatrix} \Delta\Pi(\gamma) \\ -\Delta N(\gamma) \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (5.5)$$

Учитывая тот факт, что каждый из элементов $\gamma_i \in \Gamma$ представляет собой множество возможных мероприятий (5.1), то функции $\Delta\Pi(\gamma)$ и $\Delta N(\gamma)$ являются функциями множеств, а с учетом их определений (5.2) и (5.3) они однородны и аддитивны.

5.2.2. Методика решения задачи векторной оптимизации

Сформулируем понятие решения задачи (5.5). Вариант ОТМ $\gamma^* \in \Gamma$ будем называть эффективным, если любое отклонение от него приводит к ухудшению хотя бы одного из показателей, т. е. к увеличению затрат или уменьшению переработки вагонов. Под решением задачи (5.5) будем понимать некоторый набор вариантов $\Gamma^* \in \Gamma$, в котором любой вариант является эффективным. Основным свойством

множества Γ^* является то, что любые два варианта γ_q^* и γ_r^* данного множества между собой являются несравнимыми по Парето [120], т. е. для них имеет место соотношение

$$\begin{cases} \Delta\Pi(\gamma_q^*) > \Delta\Pi(\gamma_r^*), \\ \Delta N(\gamma_q^*) > \Delta N(\gamma_r^*). \end{cases} \quad (5.6)$$

Качественный характер решения задачи (5.5) иллюстрирует кривая, представленная на рис. 5.1.

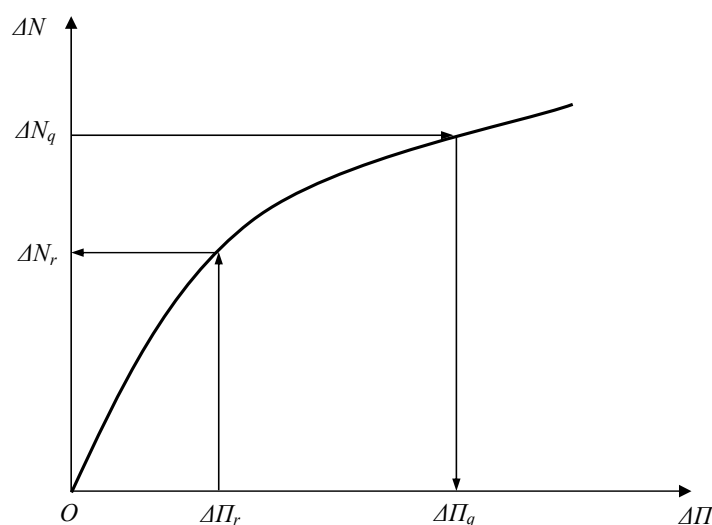


Рис. 5.1. Геометрическая интерпретация задачи векторной оптимизации параметров станции

Данная зависимость определяет уровень эффективности затрат, которые выделяются на реализацию комплекса ОТМ, связанных с повышением эффективности работы станции. Так, если необходимо увеличить перерабатывающую способность станции на величину ΔN_q , то для реализации комплекса ОТМ γ_q^* потребуется дополнительное выделение средств в размере $\Delta\Pi_q$. В случае, если планируемые затраты на модернизацию станции ограничены величиной $\Delta\Pi_r$, то с помощью данной зависимости можно определить рациональный вариант ОТМ γ_r^* , реализация которого позволит максимально увеличить перерабатывающую способность станции на величину ΔN_r при заданном уровне финансирования проекта. Точка O на рис. 5.1

соответствует существующему уровню технического оснащения и технологии работы, которые обеспечивают перерабатывающую способность N_0 при годовых приведенных затратах Π_0 .

Следует отметить, что вследствие дискретности множеств Γ и Γ^* решение задачи (5.5) в геометрической интерпретации представляет собой совокупность точек в n -мерном пространстве (5.1), каждая из которых является точкой перелома огибающей кривой и соответствует определенному варианту ОТМ $\gamma^* \in \Gamma^*$.

Если выходное множество Γ содержит незначительное количество вариантов γ_i , то построение подмножества Γ^* можно выполнить непосредственным перебором вариантов, используя правило отбора (5.6). Однако при решении реальных задач, связанных с планированием ОТМ на транспортных объектах. Такой подход является неэффективным. Для получения аналитического решения задачи векторной оптимизации воспользуемся методикой, изложенной в [118]. При этом решение задачи (5.5) сводится к решению задачи на условный экстремум:

$$\begin{cases} \Delta\Pi(\gamma) \rightarrow \min, \\ \Delta N(\gamma) \geq N^*, \gamma \in \Gamma, \end{cases} \quad (5.7)$$

где N^* – заданная величина увеличения перерабатывающей способности станции.

Для решения задачи (5.7) используется функция Лагранжа [119, 121]:

$$L(\gamma, \mu) = \Delta\Pi(\gamma) - \mu\Delta N(\gamma), \quad (5.8)$$

где μ – неопределенный множитель Лагранжа ($\mu \geq 0$).

Решением задачи (5.7) при фиксированном μ будет множество $\gamma^*(\mu)$, которое обеспечивает минимум функции Лагранжа, т. е.

$$L(\gamma^*, \mu) \rightarrow \min, \gamma^* \in \Gamma.$$

Неопределенный множитель Лагранжа определяется из неравенства

$$\Delta N[\gamma^*(\mu)] \geq N^*.$$

Для решения исходной задачи векторной оптимизации сформируем множество $\tilde{\Gamma}^*$, которое является выпуклой комбинацией множества Γ^* [118]:

$$\tilde{\Gamma}^* = \left\{ \gamma^*(\mu) : \mu \geq 0, \quad L(\gamma^*(\mu), \mu) = \min_{\gamma \in \Gamma} L(\gamma, \mu) \right\}. \quad (5.9)$$

На плоскости с координатами L и μ функция Лагранжа, как функция от μ , представляет собой прямую, причем количество таких прямых конечно в силу конечности множества Γ . Если в функцию Лагранжа вместо γ подставить $\gamma^*(\mu)$, то получим кусочно-линейную кривую, огибающую снизу указанные прямые. Пусть $\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_m$ представляют собой точки перелома огибающей кривой, тогда $\gamma^*(\mu_1), \gamma^*(\mu_2), \dots, \gamma^*(\mu_m)$ являются элементами множества $\tilde{\Gamma}^*$. Используя соотношения (5.2), (5.3) функцию Лагранжа (5.8) можно записать как

$$L(\gamma, \mu) = \sum_{\Theta_j \in \gamma} \left[\Delta P(\Theta_j) - \mu \Delta N(\Theta_j) \right], \quad (5.10)$$

Таким образом, при построении множества $\gamma^*(\mu)$ в него следует включать только такие элементы Θ_j , которые бы минимизировали выражение: $\Delta P(\Theta_j) - \mu \Delta N(\Theta_j)$, что в конечном итоге приведет к минимуму функции (5.10). С этой целью для каждого элемента (мероприятия) Θ_j необходимо определить значение множителя μ_j , который, вследствие линейности функции Лагранжа по μ , может быть получен из выражения $\Delta P(\Theta_j) / \Delta N(\Theta_j)$. Данное выражение показывает величину затрат при увеличении перерабатывающей способности на один вагон в сутки. После упорядочивания полученных значений μ_j по возрастанию поочередно формируются множества $\gamma(\mu_j)$. При этом каждое последующее множество $\gamma(\mu_j)$ формируется на базе предыдущего путем добавления одного из элементов Θ_j . Порядок добавления элементов Θ_j определяется в зависимости от соответствующих значений μ_j . Из множеств $\gamma(\mu_j)$ с учетом условия

(5.6) отбираются множества $\gamma^*(\mu_j)$, на базе которых формируется $\tilde{\Gamma}^*$ (5.9), представляющее собой решение задачи (5.7).

Однако, как показывают исследования [113, 118], при решении задачи векторной оптимизации с помощью изложенной методики полученное множество $\tilde{\Gamma}^*$ включает не все варианты из множества Γ^* . В этой связи в [118] предложен метод, который позволяет определить недостающие варианты.

Вначале формируется исходное множество γ_0 , в которое включаются все возможные элементы Θ_j . Каждое последующее множество γ формируется на базе предыдущего путем исключения одного из элементов Θ_j . При этом исключается такой элемент Θ_j , для которого множитель Лагранжа (5.10) будет минимальным, т. е.

$$\mu_j = \frac{\Delta\Pi(\gamma) - \Delta\Pi(\Theta_j)}{\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)} \rightarrow \min. \quad (5.11)$$

Среди полученных таким образом множеств отбираются варианты γ^* , несравнимые по Парето (5.6), которые включаются в множество $\tilde{\Gamma}^*$. Конечным решением задачи векторной оптимизации (5.5) является множество Γ^* , которое получается в результате объединения множеств $\tilde{\Gamma}^*$ и $\bar{\Gamma}^*$, т. е. $\Gamma^* = \tilde{\Gamma}^* \cup \bar{\Gamma}^*$.

5.3. Совершенствование технико-технологических параметров станции

5.3.1. Постановка задачи исследования

Апробация разработанной методики выполнена при определении комплекса рациональных технико-технологических параметров подсистемы расформирования одной из сортировочных станций Украины [78]. С этой целью было выполнено комплексное обследование парка приема станции H (рис. 5.2), по результатам которого построена соответствующая функциональная эргатическая модель (см. гл. 4).

Анализ конструкции путевого развития ПП и технологии его работы позволил выявить определенные недостатки. Так, входная горловина предусматривает возможность приема поездов из Ю только на два пути (№ 1 и 2), что вызывает их задержки при увеличении поездопотока с этого направления. Кроме того, в условиях постепенного увеличения объемов перевозок возникла необходимость восстановления пути № 5, который ранее был закрыт и разобран.

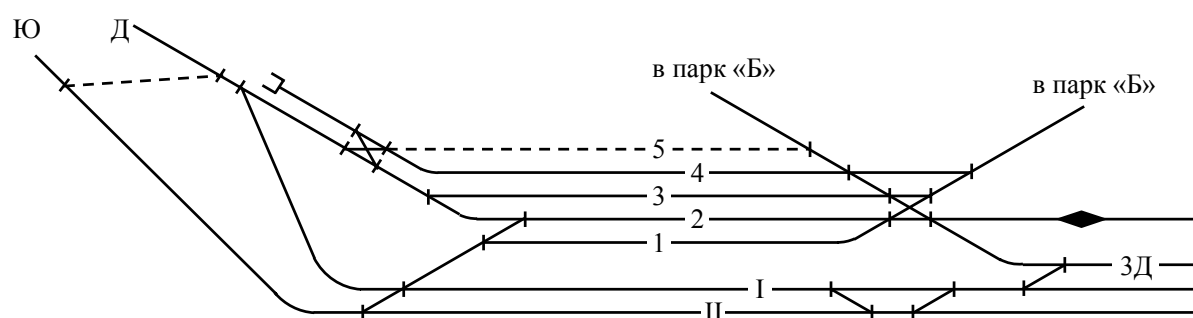


Рис. 5.2. Схема путевого развития парка приема станции с возможными вариантами реконструкции путевого развития

Технический осмотр составов в ПП выполняет одна бригада ПТО, включающая 2 группы осмотрщиков вагонов, а расформирование на горке выполняет один горочный локомотив. Как показал анализ (см. гл. 4), входной поездопоток станции Н характеризуется существенной неравномерностью, которая при таком оснащении может вызывать значительную загрузку технических средств ПП в период сгущенного прибытия поездов. Это, в свою очередь, приводит к снижению перерабатывающей способности станции в целом. В этой связи была поставлена задача исследования и выбора рациональных технико-технологических параметров ПП сортировочной станции для повышения эффективности его функционирования.

Для устранения выявленных недостатков в конструкции и технологии работы ПП (см. п. 4.1.2) был рассмотрен ряд возможных реконструкционных и организационных мероприятий, каждое из которых может быть представлено множеством W_k . Каждое такое множество включает набор возможных параметров одного из элементов ПП, на котором планируется выполнение ОТМ:

- 1) число путей в ПП $W_1 = \{4; 5\}$;
- 2) варианты конструкции входной горловины для приема поездов из Ю $W_2 = \{0; 1\}$; здесь вариант $W_2 = 0$ соответствует существующей

горловине, $W_2 = 1$ – предусматривает ее реконструкцию для обеспечения приема поездов из Ю на все пути ПП;

3) число горочных локомотивов $W_3 = \{1; 2\}$;

4) число бригад ПТО: $W_4 = \{1; 2\}$;

5) число групп осмотрщиков вагонов в каждой бригаде ПТО $W_5 = \{2; 3; 4\}$.

Таким образом, было получено 48 множеств γ_i , каждое из которых представляет собой комбинацию указанных выше мероприятий W_k (рис. 5.3).

Для получения технико-эксплуатационных показателей, которые характеризуют функционирование ПП по каждому из намеченных вариантов, было выполнено моделирование работы парка с использованием разработанной эргатической модели ПП станции. Для каждого варианта при одинаковых начальных условиях была выполнена серия экспериментов, по результатам которых были определены средние значения показателей функционирования ПП, в т. ч.: средний простой составов в парке $T_{\text{п}}$, средний простой поездов на соседних станциях $T_{\text{зп}}$, число расформированных поездов $N_{\text{р}}$, загрузка исполнителей технологических операций.

Как уже отмечалось, каждый из рассматриваемых вариантов ОТМ γ_i оценивался по двум интегральным показателям: годовые приведенные затраты на реализацию данного комплекса мероприятий P_i (тыс. у. е./год) и максимальная перерабатывающая способность парка приема N_i (вагонов/сутки), которая может быть достигнута при реализации варианта γ_i .

Затраты на реализацию каждого варианта (модифицированные приведенные расходы) могут быть определены в соответствии с рекомендациями [122, 123]. При этом в общие расходы учитываются строительные затраты на сооружение дополнительного путевого развития и приобретение маневровых локомотивов, а также эксплуатационные расходы, связанные с содержанием технических средств и оплатой труда работников станции, а также расходы, пропорциональные размерам движения (связанные с простоем поездов на подходах к станции и с простоем грузовых вагонов на станции).

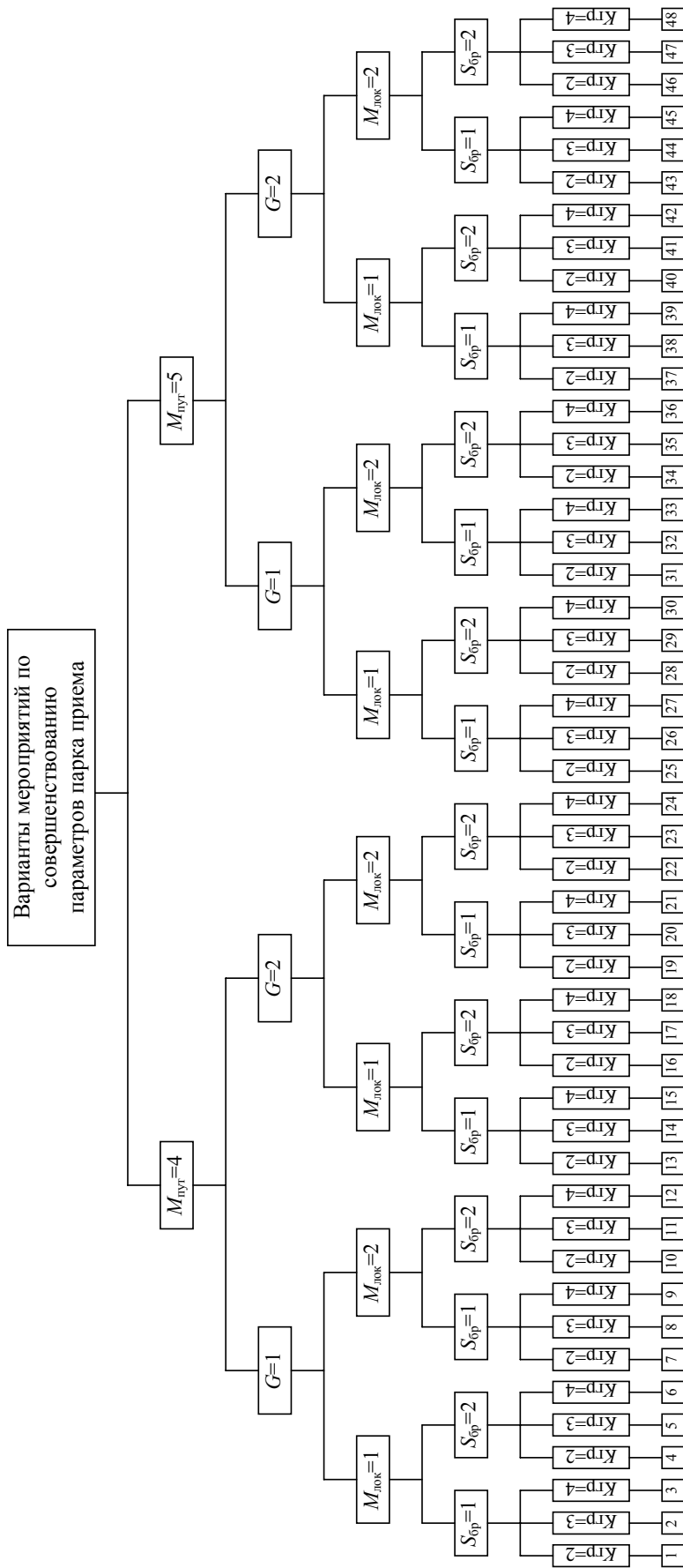


Рис. 5.3. Дерево вариантов ОТМ, направленных на совершенствование функционирования парка приема

5.3.2. Выполнение экспериментов с моделью станции

Для определения эксплуатационных расходов необходимо установить простои поездов и вагонов в каждом из рассматриваемых вариантов ОТМ. В данном исследовании указанные значения простоев определялись по результатам моделирования работы парка приема с использованием его эргатической функциональной модели.

Для определения значения величины перерабатывающей способности N_i , которая может быть достигнута при реализации каждого из рассматриваемых вариантов ОТМ γ_i , эксперименты с моделью выполнялись при различной интенсивности λ входящего поездопотока. При этом максимально возможное значение перерабатывающей способности N_i определялось по эксперименту с пороговым значением λ^* , при котором был достигнут критический уровень насыщения системы обслуживания парка приема [124]. Пороговое значение интенсивности λ^* фиксировалось, когда при его дальнейшем увеличении суточное число обслуженных поездов в парке не изменялось.

В результате моделирования работы парка приема станции H при различных вариантах технического оснащения и организации технологического процесса было получено исходное множество вариантов $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{48}\}$, которое приведено в табл. 5.1. Существующий набор технико-технологических параметров парка приема в табл. 5.1 характеризует вариант № 1: $\gamma_1 = \{4, 0, 1, 1, 2\}$.

При этом при величине приведенных годовых эксплуатационных расходов $\Pi_1 = 2\,671,2$ тыс. у. е./год обеспечивается перерабатывающая способность $N_1 = 1\,540$ вагонов/сутки.

Геометрической интерпретацией множества Γ является поле точек, которое представлено на рис. 5.4.

Таблица 5.1

Результаты моделирования работы парка приема станции

№ п/п	Множество γ_i					Показатели		№ п/п	Множество γ_i					Показатели	
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Π_i	N_i		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Π_i	N_i
1	4	0	1	1	2	2 671,2	1 540	25	4	1	1	1	2	2 973,7	1 540
2	4	0	1	1	3	3 204,0	1 980	26	4	1	1	1	3	3 510,1	1 980
3	4	0	1	1	4	3 490,0	2 200	27	4	1	1	1	4	3 790,3	2 200
4	4	0	1	2	2	3 425,8	2 200	28	4	1	1	2	2	3 703,5	2 200
5	4	0	1	2	3	3 749,0	2 420	29	4	1	1	2	3	3 979,0	2 420
6	4	0	1	2	4	4 016,4	2 530	30	4	1	1	2	4	4 281,6	2 530
7	4	0	2	1	2	3 199,0	1 705	31	4	1	2	1	2	3 494,9	1 705
8	4	0	2	1	3	3 705,7	2 145	32	4	1	2	1	3	4 023,0	2 145
9	4	0	2	1	4	4 002,9	2 420	33	4	1	2	1	4	4 281,9	2 420
10	4	0	2	2	2	4 000,2	2 475	34	4	1	2	2	2	4 231,6	2 475
11	4	0	2	2	3	4 337,2	2 805	35	4	1	2	2	3	4 582,1	2 805
12	4	0	2	2	4	4 625,5	3 135	36	4	1	2	2	4	4 832,0	3 135
13	5	0	1	1	2	2 996,1	1 650	37	5	1	1	1	2	3 222,6	1 595
14	5	0	1	1	3	3 434,4	2 035	38	5	1	1	1	3	3 727,5	2 035

Окончание табл. 5.1

№ п/п	Множество γ_i					Показатели		№ п/п	Множество γ_i					Показатели	
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Π_i	N_i		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Π_i	N_i
15	5	0	1	1	4	3 643,5	2 200	39	5	1	1	1	4	3 932,9	2 200
16	5	0	1	2	2	3 623,3	2 255	40	5	1	1	2	2	3 908,0	2 255
17	5	0	1	2	3	3 950,7	2 475	41	5	1	1	2	3	4 225,5	2 475
18	5	0	1	2	4	4 230,7	2 585	42	5	1	1	2	4	4 513,8	2 585
19	5	0	2	1	2	3 346,6	1 705	43	5	1	2	1	2	3 654,2	1 705
20	5	0	2	1	3	3 934,3	2 200	44	5	1	2	1	3	4 191,6	2 200
21	5	0	2	1	4	4 188,6	2 475	45	5	1	2	1	4	4 492,6	2 475
22	5	0	2	2	2	4 203,6	2 585	46	5	1	2	2	2	4 513,3	2 585
23	5	0	2	2	3	4 523,0	2 860	47	5	1	2	2	3	4 841,9	2 860
24	5	0	2	2	4	4 756,6	3 190	48	5	1	2	2	4	5 090,6	3 245

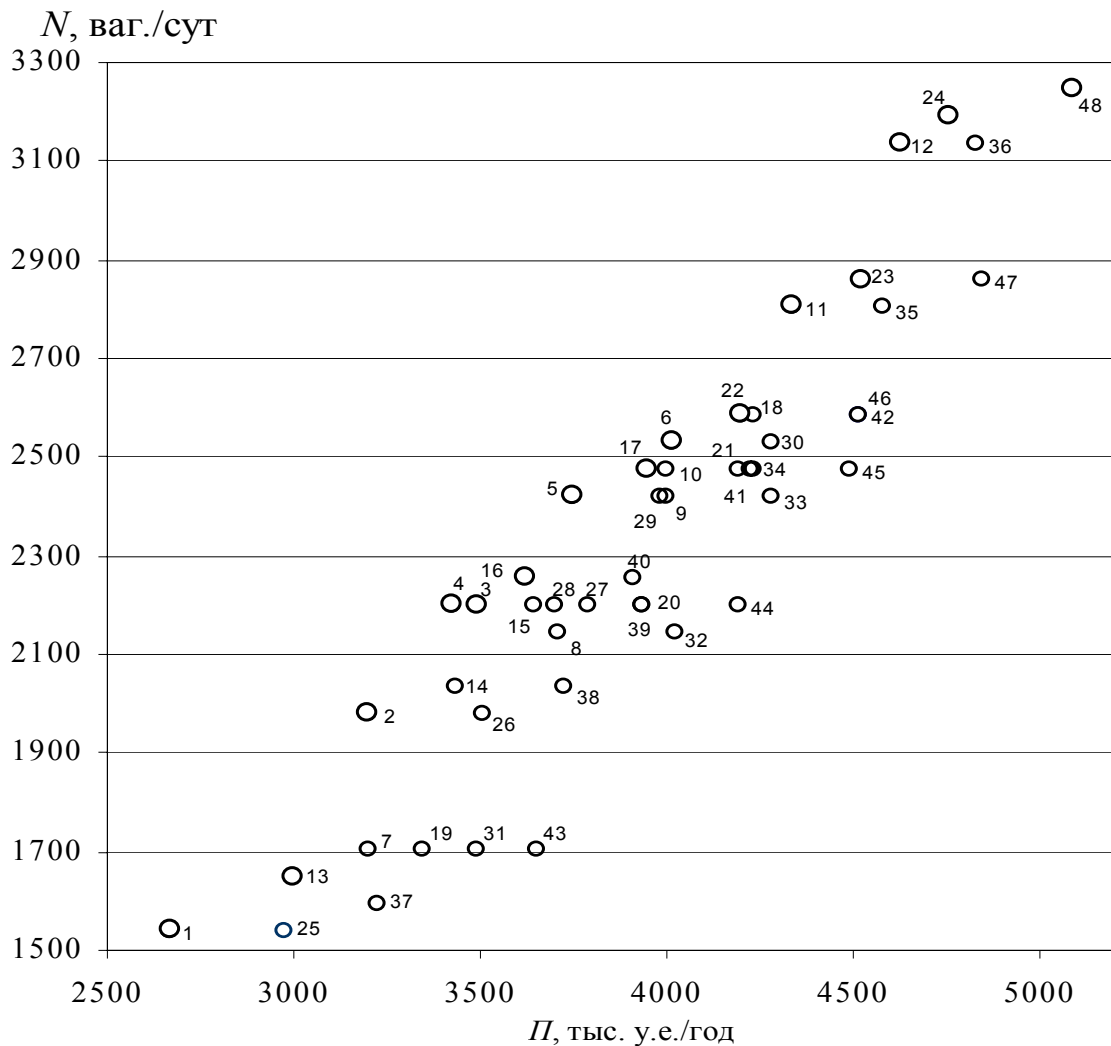


Рис. 5.4. Геометрическая интерпретация множества Γ в виде поля точек

5.3.3. Определение рациональных технико-технологических параметров железнодорожной станции

Для определения рациональных вариантов ОТМ, обеспечивающих максимальную эффективность работы ПП станции в зависимости от объемов финансирования проекта, поставленная задача совершенствования технико-технологических параметров ПП была решена как задача векторной оптимизации (5.5) с помощью изложенной в п. 5.2. методики. Конечной целью решения указанной задачи является выделение из исходного множества Γ , полученного по результатам мо-

делирования работы ПП, подмножества Γ^* , которое включает только эффективные варианты ОТМ (см. п. 4.2).

При решении задачи (5.5) рассмотренные множества W_k возможных мероприятий были представлены в виде множеств Θ_j (5.1):

1) Θ_1 – комплекс мероприятий, предусматривающих открытие 5-го пути;

2) Θ_2 – комплекс ОТМ, предусматривающий реконструкцию входной горловины, для обеспечения возможности приема поездов из Ю на все пути парка;

3) Θ_3 – приобретение дополнительного маневрового локомотива;

4) Θ_4 – мероприятия, связанные с увеличением числа бригад ПТО $S_{\text{бр}}$ и числа групп осмотровиков вагонов в бригаде $K_{\text{гр}}$. При этом были выделены следующие мероприятия: $\Theta_{41} - K_{\text{гр}} = 3$ при $S_{\text{бр}} = 1$; $\Theta_{42} - K_{\text{гр}} = 4$ при $S_{\text{бр}} = 1$; $\Theta_{43} - K_{\text{гр}} = 2$ при $S_{\text{бр}} = 2$; $\Theta_{44} - K_{\text{гр}} = 3$ при $S_{\text{бр}} = 2$; $\Theta_{45} - K_{\text{гр}} = 4$ при $S_{\text{бр}} = 2$.

Таким образом, было получено 8 возможных комплексов ОТМ Θ_j , направленных на совершенствование технического оснащения и технологии работы ПП. Следует отметить, что мероприятия Θ_{41} , Θ_{42} , Θ_{43} , Θ_{44} и Θ_{45} являются несовместными и, соответственно, не могут быть включены в один и тот же комплекс γ_i . Реализация каждого мероприятия Θ_j позволяет увеличить имеющуюся перерабатывающую способность $N_0 = 1540$ вагонов/сутки на некоторую величину $\Delta N(\Theta_j)$, но в то же время приводит к увеличению годовых приведенных расходов $P_0 = 2671,2$ тыс. у. е./год на величину $\Delta P(\Theta_j)$. Для установления значений $\Delta N(\Theta_j)$ и $\Delta P(\Theta_j)$ был выполнен анализ результатов моделирования работы ПП при реализации различных вариантов ОТМ, на основании чего получены значения указанных оценок для каждого из рассмотренных мероприятий Θ_j . Результаты расчетов приведены в табл. 5.2.

Для построения множества эффективных вариантов Γ^* сформируем вначале множество $\tilde{\Gamma}^*$ с помощью методики, изложенной в п. 5.2. С этой целью для каждого из возможных множеств Θ_j (мероприятий) определим значение множителя Лагранжа μ_j . Результаты

расчетов также представлены в табл. 5.2. После упорядочивания полученных значений μ_j по возрастанию были получены множества $\gamma(\mu)$ путем последовательного включения в них Θ_j . Последовательность выполнения расчетов, связанных с формированием множеств $\gamma(\mu)$, приведена в приложении Г.1. Из совокупности полученных множеств $\gamma(\mu)$ с учетом условия (5.6) были отобраны эффективные множества (варианты ОТМ) $\gamma^*(\mu)$, несравнимые по Парето. На базе этих вариантов построено множество $\tilde{\Gamma}^*$, элементы которого представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.2

Значения оценок $\Delta\Pi(\Theta_j)$, $N(\Theta_j)$ и множителей Лагранжа μ_j для планируемых мероприятий

Мероприятие Θ_j	$\Delta\Pi(\Theta_j)$, тыс. у. е./год	$\Delta N(\Theta_j)$, ваг./сут	μ_j
Θ_1	209,8	110,0	1,907
Θ_2	280,9	55,0	5,107
Θ_3	535,4	315,2	1,699
Θ_{41}	439,0	446,9	0,982
Θ_{42}	618,0	680,6	0,908
Θ_{43}	591,4	810,4	0,730
Θ_{44}	748,7	910,2	0,823
Θ_{45}	853,5	1 005,5	0,849

В табл. 5.3 каждому варианту ОТМ поставлен в соответствие исходный номер данного варианта, присвоенный ему при выполнении экспериментов с моделью ПП (см. табл. 5.1). Кроме того, для каждого варианта $\gamma^*(\mu)$ в соответствии с выражениями (5.2) и (5.3) определено увеличение приведенных затрат $\Delta\Pi[\gamma^*(\mu)]$ при реализации данного комплекса ОТМ, а также ожидаемое увеличение перерабатывающей способности подсистемы расформирования станции $\Delta N[\gamma^*(\mu)]$.

Выполним проверку условия $\tilde{\Gamma}^* = \Gamma^*$, т. е. определим, насколько полно элементы множества $\tilde{\Gamma}^*$ отражают содержание множества Γ^* . Для этого необходимо выявить элементы $\gamma^* \in \Gamma^*$, не вошедшие в состав множества $\tilde{\Gamma}^*$. С этой целью построим множество $\bar{\Gamma}^*$ по методике, изложенной в п. 5.2.

Таблица 5.3

Множество эффективных вариантов $\tilde{\Gamma}^*$

№ п/п	№ варианта	Вариант ОТМ $\gamma^*(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma^*(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma^*(\mu)]$, ваг.
1	2	Θ_{41}	439,0	446,9
2	4	Θ_{43}	591,4	810,4
3	6	Θ_{45}	748,7	910,2
4	5	Θ_{44}	853,5	1 005,5
5	11	Θ_3, Θ_{44}	1 284,1	1 225,4
6	9	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 336,6	1 235,6
7	12	Θ_3, Θ_{45}	1 388,9	1 320,7
8	23	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 493,9	1 335,4
9	24	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 598,7	1 430,7
10	48	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 879,6	1 485,7

На первом этапе формируется исходное множество γ_0 , в которое включаются все возможные элементы Θ_j , т. е. $\gamma_0 = \{\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4\}$. Каждое последующее множество γ_i формируется на базе предыдущего γ_{i-1} путем исключения из него одного из элементов Θ_j , для которого выполняется условие (5.11). После исключения очередного элемента Θ_j выполняется корректировка значений $\Delta\Pi(\gamma_i)$ и $\Delta N(\gamma_i)$ и пересчет соотношения (5.11) для оставшихся элементов. Расчеты, связанные с формированием множеств γ_i , приведены в приложении Г.2. Из совокупности полученных множеств γ_i с учетом условия (5.6) были отобраны эффективные множества γ^* , несравнимые по Парето,

на основе которых построено множество $\bar{\Gamma}^*$; элементы этого множества представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Множество эффективных вариантов $\bar{\Gamma}^*$

№ п/п	№ варианта	Вариант ОТМ γ_i	$\Delta\Pi(\gamma_i)$, тыс. у. е.	$\Delta N(\gamma_i)$, ваг.
1	2	Θ_{41}	439,0	446,9
2	4	Θ_{43}	591,4	810,4
3	6	Θ_{44}	748,7	910,2
4	16	Θ_1, Θ_{43}	801,2	920,4
5	5	Θ_{45}	853,5	1 005,2
6	17	Θ_1, Θ_{44}	958,5	1 020,2
7	40	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 336,6	1 235,6
8	41	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 493,9	1 335,4
9	42	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 598,7	1 430,4
10	48	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 879,6	1 485,7

Сравнительный анализ множеств $\tilde{\Gamma}^*$ (табл. 5.3) и $\bar{\Gamma}^*$ (табл. 5.4) позволил выявить варианты $\gamma^* \in \bar{\Gamma}^*$, не вошедшие во множество $\tilde{\Gamma}^*$. Таковыми являются варианты $\gamma_{16}^* = \{\Theta_1, \Theta_{43}\}$ и $\gamma_{17}^* = \{\Theta_1, \Theta_{44}\}$. В результате объединения множеств $\tilde{\Gamma}^*$ и $\bar{\Gamma}^*$ получено множество Γ^* , которое является решением поставленной оптимизационной задачи. Элементы множества Γ^* представлены в табл. 5.5.

Таким образом, с помощью методов векторной оптимизации в исходном множестве Γ (см. табл. 5.1) было выделено подмножество Γ^* (см. табл. 5.5), которое включает лишь эффективные варианты γ^* . На основании данных об элементах множества Γ^* была построена кусочно-линейная кривая, точками перелома которой являются эффективные варианты ОТМ (рис. 5.5).

Полученное решение позволяет осуществлять выбор рационального комплекса мероприятий, обеспечивающих максимальную эффективность работы парка приема, в зависимости от объемов финан-

сирования проекта. Так, при допустимых годовых приведенных расходах $П_i$ 4 млн у. е. эффективным является вариант № 6, который предполагает увеличение количества бригад ПТО в парке до двух и наличие в каждой бригаде четырех групп осмотровиков вагонов; при этом сохраняется существующее техническое оснащение ПП (конструкция путевого развития парка и 1 маневровый локомотив). Реализация данного варианта обеспечивает перерабатывающую способность парка 2 530 вагонов/сутки. Для сравнения вариант № 32 при таких же расходах позволяет переработать только 2 145 вагонов. Анализ полученного решения показал, что применение разработанной методики позволяет повысить эффективность планируемых на станции мероприятий в среднем на 15 %.

Таблица 5.5

Множество эффективных вариантов Γ^*

№ п/п	№ варианта	Вариант ОТМ γ^*	$\Delta П(\gamma^*)$, тыс. у. е.	$\Delta N(\gamma^*)$, ваг.
1	2	Θ_{41}	439,0	446,9
2	4	Θ_{43}	591,4	810,4
3	6	Θ_{45}	748,7	910,2
4	16	Θ_1, Θ_{43}	801,2	920,4
5	5	Θ_{44}	853,5	1 005,5
6	17	Θ_1, Θ_{44}	958,5	1 020,2
7	11	Θ_3, Θ_{44}	1 284,1	1 225,4
8	9	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 336,6	1 235,6
9	12	Θ_3, Θ_{45}	1 388,9	1 320,7
10	23	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 493,9	1 335,4
11	24	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 598,7	1 430,7
12	48	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 879,6	1 485,7

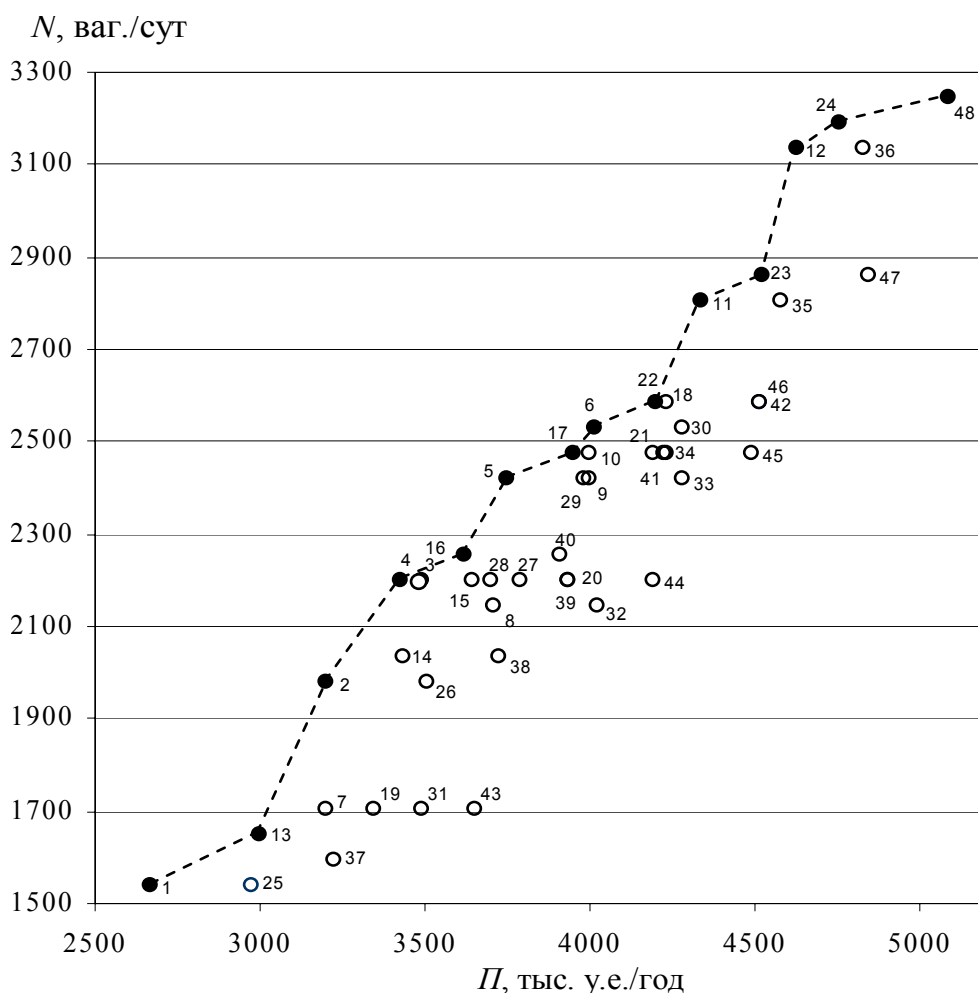


Рис. 5.5. Геометрическая интерпретация решения задачи совершенствования конструкции и технологии работы парка приема станции

Подобные решения могут быть получены для всех технических станций участка железной дороги, что позволит руководству дороги определить наиболее эффективный вариант распределения ресурсов при модернизации станций участка, обеспечивающий требуемую пропускную способность станций и всего участка при минимуме затрат.

Компьютерные тренажеры для подготовки оперативно-диспетчерского персонала железнодорожных станций

6.1. Проблемы повышения качества профессиональной подготовки оперативно-диспетчерского персонала железных дорог

Как уже отмечалось, эффективность и безопасность функционирования железнодорожных станций зависит как от уровня их технического оснащения и технологии работы, так и от качества системы управления, основным звеном которой является оперативно-диспетчерский персонал: дежурные по станции, маневровые диспетчеры, дежурные по горке. Надежная и уверенная работа ОДП в любых условиях, особенно в нестандартных ситуациях, является важным фактором обеспечения безопасности движения и повышения эффективности работы железнодорожных станций. Вместе с тем анализ причин браков, допускаемых на отечественных железных дорогах в системе организации перевозок, показывает, что около 40 % таких случаев происходит по вине дежурных по станции и поездных диспетчеров [125]. Подобная тенденция наблюдается и на зарубежных железных дорогах [126]. Неправильные или нерациональные управляющие действия дежурного по станции или маневрового диспетчера могут привести не только к снижению эффективности работы станции, но зачастую являются причиной возникновения аварийной ситуации. В этой связи проблема профессионального отбора кадров и качественной подготовки работников оперативно-диспетчерского звена всегда являлась актуальной и требовала особого внимания.

Традиционная система подготовки ОДП на железных дорогах предполагает передачу знаний и навыков опытным инструктором новому работнику. При этом претендент на должность ОДП проходит стажировку на реальном рабочем месте, овладевая навыками и приемами работы, изучая технологический процесс и различные руководящие документы. Обучение на рабочем месте продолжается в течение довольно длительного периода (от трех до шести месяцев). После стажировки новый работник сдает экзамен и работает несколько смен под наблюдением инструктора, а далее приступает к самостоятельной работе. При этом нередки случаи, когда после курса обучения стажер может быть признан непригодным к выполнению работы, связанной с управлением движением поездов. Так, в [127] указывается, что основной причиной нарушений безопасности движения по хозяйству перевозок является несоответствие субъективных возможностей диспетчерского персонала характеру выполняемой работы. В большинстве же случаев вывод о непригодности работника к управлению движением следует после совершения им действий, ставших причиной аварии. Кроме того, по текущей деятельности часто невозможно сделать вывод о предполагаемых действиях работника в нестандартных ситуациях. Имитировать же возникновение нестандартной ситуации для отработки соответствующих действий при обучении на реальном рабочем месте зачастую не представляется возможным.

6.2. Пути повышения профессионального уровня ОДП

Проблемы повышения качества профессиональной подготовки ОДП железных дорог могут быть решены, если наряду с традиционными методами его подготовки использовать автоматизированные обучающие системы (АОС), среди которых наиболее эффективными являются имитационные тренажеры на базе современных средств вычислительной техники. Такие тренажеры при относительно низкой стоимости, по сравнению с аппаратными и программно-аппаратными тренажерами, позволяют моделировать практически любую эксплуатационную ситуацию, которая может возникнуть на станции в реальных условиях, а также решать широкий круг задач, связанных с обу-

чением ОДП. При этом проблема создания подобных тренажеров сводится лишь к разработке соответствующего программного обеспечения.

Необходимо отметить, что компьютерный тренинг широко применяется во многих отраслях производства. В Украине огромный опыт создания и использования тренажерных систем накоплен в энергетической отрасли [128, 129], на воздушном [130–133] и морском транспорте [134–136]. На железнодорожном транспорте тренажеры на протяжении многих лет с успехом используются при обучении машинистов локомотивов [137–141].

Что касается подготовки оперативно-диспетчерского персонала для железных дорог, то, в первую очередь, следует отметить разработки аппаратных тренажеров, которые полностью повторяют реальные рабочие места (пульт-табло) дежурных по станции. В 50–60-е годы прошлого века в СССР, США, Японии, Великобритании и ряде других стран для обучения оперативно-диспетчерского персонала железных дорог стали разрабатывать и применять различные учебно-тренировочные средства, среди которых наиболее эффективно зарекомендовали себя тренажеры-симуляторы. Первые тренажеры ОДП были аппаратными и представляли собой реальное рабочее место, реализованное на релейно-контактном оборудовании. Такой тренажер позволял отрабатывать порядок действий в той или иной ситуации (ситуационный тренажер). Исходную ситуацию в начале тренировки задавал инструктор, на которого также возлагались имитация оперативных переговоров, контроль и оценка работы тренируемого. Несмотря на то что аппаратные тренажеры достаточно успешно использовались при обучении ОДП железных дорог, они имели существенные недостатки, что значительно ограничивало их применение.

С развитием средств вычислительной техники в 70–80-е годы прошлого столетия появились первые тренажеры, в которых аппаратная часть функционировала совместно с программно-моделирующим модулем [142, 143]. В таких тренажерах моделирующая часть возложена на ЭВМ, которая взаимодействует с пультом управления (аппаратная часть). При этом на пульте отображается необходимая в работе информация. Управляющие воздействия тренируемого через устройства сопряжения передаются в ЭВМ. Подобный принцип реализован и в тренажере для подготовки поездных диспетчеров [62]. Недостатком указанных тренажеров является их ограниченная

функциональность, достаточно высокая стоимость, а также необходимость присутствия инструктора, выполняющего имитацию технологического процесса работы станции и связанных с этим оперативных переговоров.

Интенсивное развитие средств вычислительной техники и широкое внедрение информационных технологий на железнодорожном транспорте в последние годы создало предпосылки для разработки программируемых тренажеров на базе серийных ПЭВМ.

Особого внимания в этом отношении заслуживает опыт зарубежных железных дорог. Многие ведущие зарубежные железнодорожные компании широко используют компьютерный тренинг при подготовке ОДП [144–146]. С этой целью ими созданы специальные центры компьютерной подготовки персонала, выделяются значительные средства на разработку тренажеров. В США, Франции, Германии, Японии железнодорожные компании предписывают обязательный компьютерный тренинг для всех принимаемых на работу операторов и тренажерный курс переподготовки для всех работников оперативно-диспетчерского звена не реже одного раза в год. Более того, внутренние правила многих компаний предполагают обязательный восстановительный тренажерный курс после отпусков, болезни и т. д. [147, 148].

В связи с широким внедрением на зарубежных железнодорожных станциях систем микропроцессорной централизации (МПЦ), заменяющих традиционные системы ЭЦ и МРЦ, применение компьютерных тренажеров для подготовки операторов становится еще более эффективным, т. к. в этом случае такой тренажер позволяет полностью имитировать реальное рабочее место [149–151]. В качестве примера можно привести компьютерный тренажер SESAM, разработанный фирмой *Simiens* и введенный в действие на Государственных дорогах Германии [152].

Значительный опыт в вопросе разработки современных тренажерных систем для подготовки диспетчерского персонала, связанного с управлением движением поездов, накоплен на российских железных дорогах [153–156]. Среди множества разработок особый интерес представляет «Автоматизированная обучающая система для оперативного и диспетчерского персонала хозяйства перевозок» (АОС-Д), разработанная специалистами ПГУПС совместно с НПО ЖелДорАвтоматизация» [157–160]. Система АОС-Д представляет собой

программный комплекс, центральное место в котором занимают динамические тренажеры-имитаторы, позволяющие моделировать работу железнодорожных станций и участков, а также ситуационные тренажеры, позволяющие отрабатывать порядок действий ДСП и ДНЦ в нештатных ситуациях. Также заслуживает внимания тренажерный комплекс для подготовки диспетчеров метрополитена, разработанный в МИИТе [161, 162]. Ядром тренажера является модель линии метрополитена, которая позволяет имитировать работу основных подсистем линии, связанных с движением поездов, воздействия внешней среды, а также реакцию работников и технических средств на управляющие команды поездного диспетчера. Тренажер построен на основе действующего АРМ диспетчера реальной линии метрополитена. К недостаткам указанных тренажеров следует отнести сравнительно упрощенное моделирование технологических процессов работы станций и участков, а также необходимость присутствия инструктора, который в процессе тренировки имитирует оперативные переговоры, вносит коррективы в технологический процесс, контролирует правильность выполнения действий тренируемых. В автономном же режиме тренировки отсутствует возможность имитации оперативных переговоров. Вместе с тем, как показывают исследования деятельности ОДП железных дорог [163, 164], до 80 % рабочего времени указанные работники тратят на ведение переговоров с другими участниками перевозочного процесса (дежурными по станциям, машинистами локомотивов, исполнителями работ, диспетчерами соседних участков и т. д.). Поэтому отработка регламента оперативных переговоров является весьма важным элементом в системе подготовки ОДП железных дорог.

В последнее время при разработке тренажеров-симуляторов все шире используются современные средства визуализации на основе инструментария виртуальной реальности [165, 166] и 3D-технологий [167], а также с применением практики деловых игр [166, 168].

В Украине работы по созданию тренажеров для подготовки ОДП железных дорог ведутся лишь несколько последних лет и число имеющихся разработок в этом направлении сравнительно невелико. В качестве примера можно привести программно-аппаратный тренажерный комплекс DOROGA, разработанный специалистами УкрГУЖТ [169].

Вместе с тем в Украине в настоящее время при подготовке ОДП железнодорожных участков и станций компьютерный тренинг практически не используется, что существенно снижает эффективность процесса обучения персонала. В этой связи на протяжении нескольких последних лет сотрудниками Горочноиспытательной лаборатории Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДИИТ) активно ведутся работы по созданию компьютерных тренажеров для подготовки ОДП железнодорожного транспорта [69, 70, 170–173]. В настоящее время специалистами ДИИТа разработаны и внедрены тренажеры для подготовки ДСП нескольких крупных сортировочных станций Украины, активно используются разработанные тренажеры-симуляторы в нескольких профильных учебных заведениях Украины при обучении студентов [70, 171], разработана технология подготовки ДСП станций железнодорожного участка на базе локальной вычислительной сети [172, 173].

6.3. Принципы построения имитационного тренажера дежурного по станции

6.3.1. Требования, предъявляемые к компьютерным тренажерам ОДП

Для получения наибольшего эффекта используемый при подготовке персонала компьютерный тренажер должен максимально соответствовать реальному рабочему месту ОДП и адекватно моделировать реальный технологический процесс работы объекта управления (участка, станции, парка и т. д.). Кроме того, тренажер должен обеспечивать широкий комплекс сервисных функций по организации и сопровождению тренировок. В этой связи перед разработкой тренажера ДСП были сформулированы требования к его функциональной части. При этом учитывался опыт создания такого рода тренажеров, мнение специалистов железнодорожного транспорта, а также эргономические требования. Имитационный тренажер ДСП должен обеспечивать:

- максимальное приближение отображения рабочего места ДСП к реальному;
- изменение индикации контрольных элементов модели рабочего места ДСП в соответствии с текущим состоянием элементов станционной инфраструктуры;
- детальную (пооперационную) имитацию технологического процесса станции;
- возможность управления маршрутами движения объектов подвижного состава и технологическим процессом их обслуживания;
- возможность имитации информационного взаимодействия ДСП с работниками, принимающими участие в технологическом процессе работы станции;
- возможность имитации неисправностей станционных устройств и аварийных ситуаций;
- функционирование в реальном и ускоренном масштабе времени, а также возможность остановки тренировки для изучения проблемных ситуаций;
- автономность тренировки (возможность работы на тренажере без инструктора);
- широкий набор сервисных функций (помощь, справка, редактор начальных условий, фиксация ошибок и др.);
- протоколирование работы, расчет показателей тренировки и ее оценку.

Следует также отметить, что для сокращения затрат на разработку и реализацию тренажера целесообразно детально моделировать только те станционные процессы и их параметры, которые ДСП наблюдает на реальном рабочем месте или может контролировать посредством взаимодействия с другими работниками; для процессов, которые ДСП непосредственно не контролирует, достаточно моделировать только их конечные результаты.

6.3.2. Структура имитационного тренажера

В структуре тренажера ДСП можно выделить три взаимосвязанные составляющие: 1) информационную модель рабочего места ДСП (ИМРМ); 2) функциональную модель станции (ФМС); 3) модель инструктора (МИ). Основу тренажера составляет мощная эргатическая имитационная модель соответствующей станции. Таким образом,

разработка компьютерных тренажеров для подготовки ОДП железнодорожных станций является еще одним важным направлением применения их функциональных эргатических моделей.

Информационная модель тренажера предназначена для имитации реального рабочего места ДСП и отображения в процессе тренировки всей необходимой в работе информации – как визуальной, так и вербальной. ФМС обеспечивает моделирование технологического процесса работы станции по обслуживанию поездов и маневровых составов, имитирует работу системы станционной автоматики, а также моделирует все передвижения в пределах станции и на подходах к ней. Модель инструктора обеспечивает организацию, сопровождение и оценку тренировки. Структура тренажера ДСП и функции его составляющих приведены на рис. 6.1.

Очевидно, что наибольший эффект от применения такого рода тренажеров может быть получен в том случае, когда работник проходит обучение на тренажере именно той станции, где ему в последствии предстоит работать. В этой связи возникает проблема тиражирования тренажеров для конкретных станций. Для ее решения в разработанном тренажере ДСП была реализована модульная структура построения (рис. 6.2).

Синхронизация модулей выполняется в дискретные моменты системного времени с помощью специально разработанного языка запросов (см. гл. 3). Модульная организация позволяет легко модифицировать ФМС в соответствии с конструкцией и технологией моделируемой станции.

Таким образом, каждый тренажерный комплекс представляет собой набор универсальных программных модулей, построенных на объектно-ориентированной платформе. Каждый такой модуль функционирует автономно, а их взаимодействие выполняется через модуль синхронизации (см. рис. 6.2) с помощью специально разработанного языка запросов. Настройка параметров отдельных модулей выполняется в зависимости от технического оснащения и технологии работы конкретной станции. При этом для автоматизированного построения такого рода моделей и тренажеров разработаны специальные программно-инструментальные средства (редакторы), что дает возможность в сравнительно короткие сроки создавать имитационные тренажеры для подготовки ДСП разных станций.

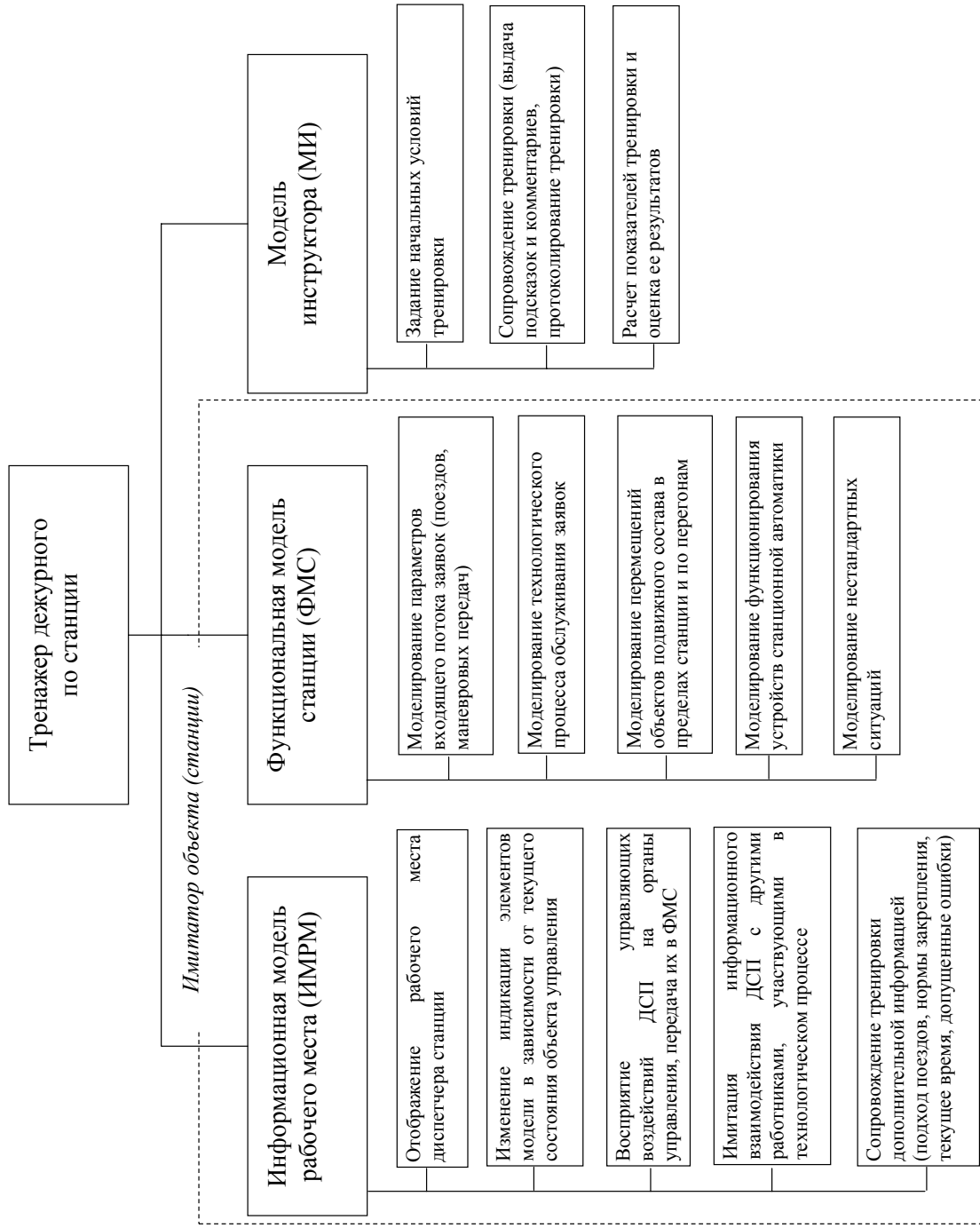


Рис. 6.1. Структура тренажера ДСП и функции его составляющих

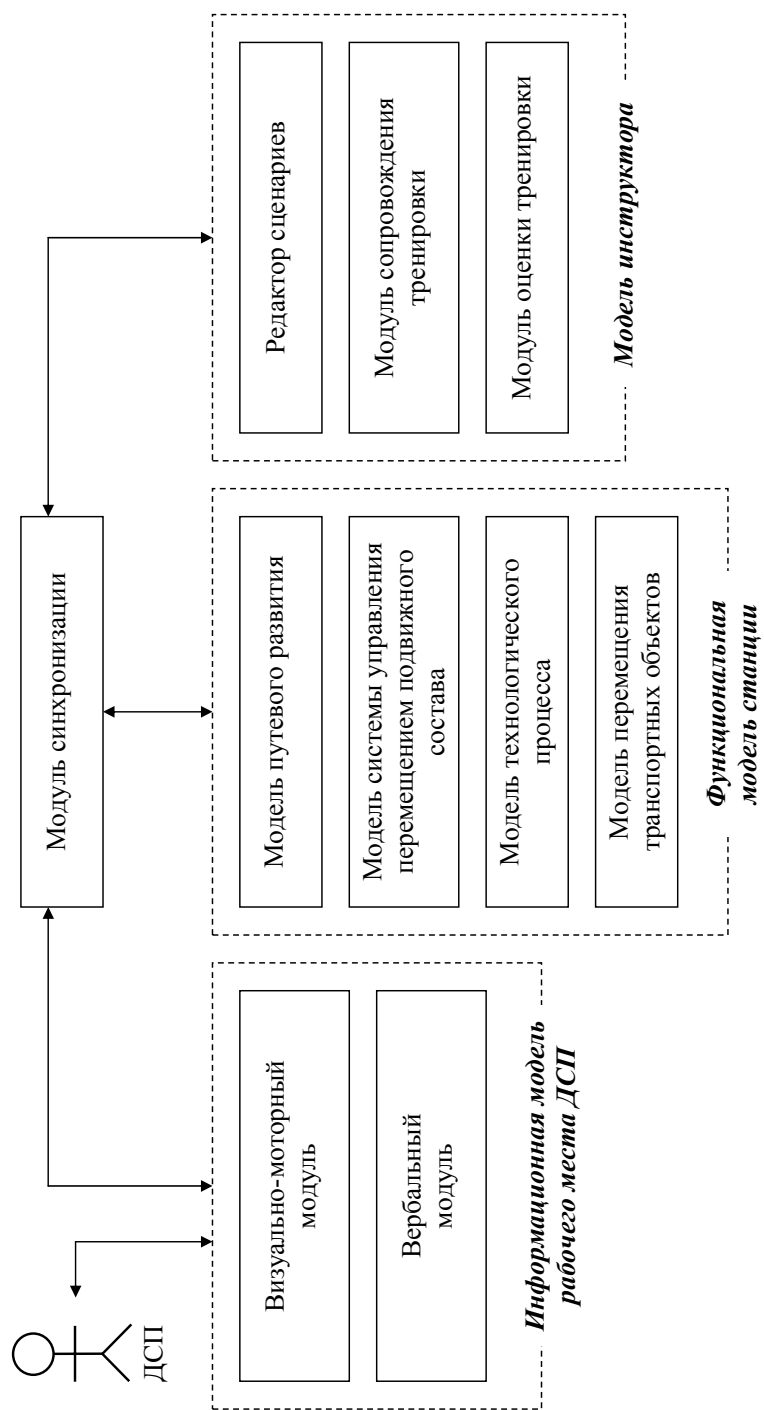


Рис. 6.2. Модульная структура тренажера ДСП

6.3.3. Функциональная характеристика тренажера

В разработанных тренажерах на экране ПЭВМ отображается рабочее место дежурного по станции, в т. ч. световая мнемосхема парка или станции, сигнальные лампочки, кнопки и рукоятки управления, а также другие элементы, необходимые в работе (рис. 6.3а, 6.3б).

Тренажеры позволяют готовить поездные и маневровые маршруты путем переключения стрелочных рукояток и нажатия кнопок светофоров. При этом используется манипулятор «мышь». В процессе тренировки детально моделируется технологический процесс обслуживания поездов разных категорий с учетом всех предусмотренных операций. Кроме того, моделируются все поездные и маневровые передвижения в пределах станции и по прилегающим перегонам. При этом все передвижения отображаются на мнемосхеме станции так же, как и на реальных пультах. Для изучения и отработки установленного регламента информационного взаимодействия во время тренировки осуществляется имитация оперативных переговоров, которые ДСП ведет в процессе работы. С этой целью предусмотрен вывод в звуковой и текстовой форме сообщений дежурному по станции от всех работников, участвующих в технологическом процессе (рис. 6.4, а). Вызов необходимого работника реализован с помощью системы меню и команд (рис. 6.4, б).

Разработанные тренажеры также предусматривают возможность работы в условиях нарушения нормального функционирования средств станционной автоматики. Это позволяет изучать порядок действий и регламент переговоров в нештатных ситуациях. В процессе тренировки фиксируются все допущенные ошибки. По результатам тестирования определяются основные показатели тренировки, которые позволяют оценить уровень профессиональной подготовки. В состав каждого тренажерного комплекса также включен редактор сценариев, который позволяет быстро составить задание на тренировку с любым уровнем сложности (рис. 6.5).

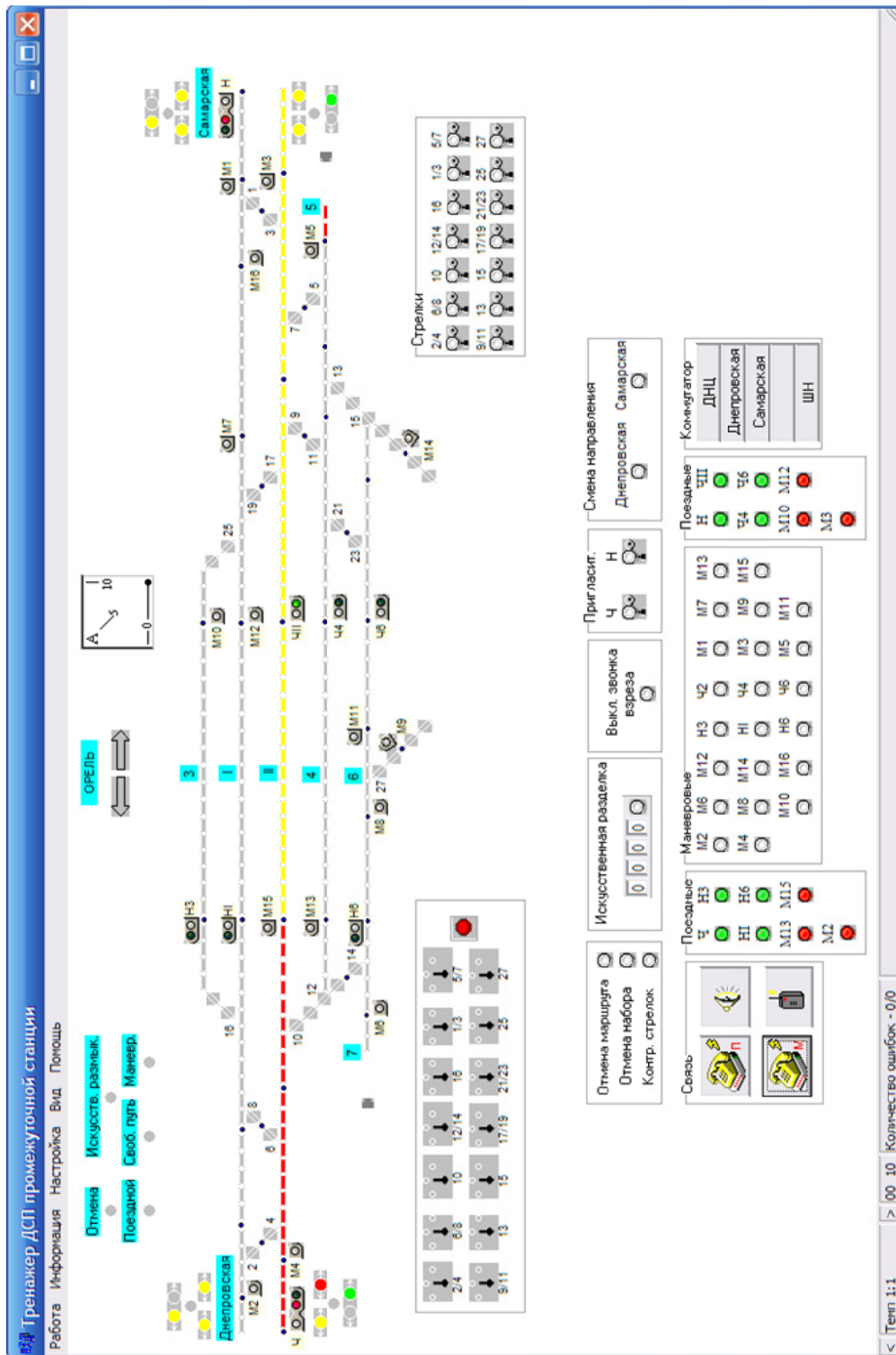
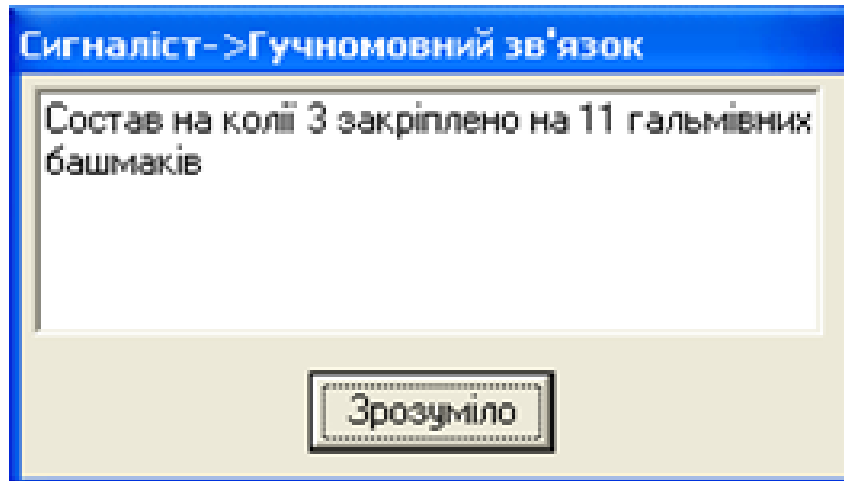


Рис. 6.3а. Внешний вид тренажера ДСП промежуточной станции

а



б

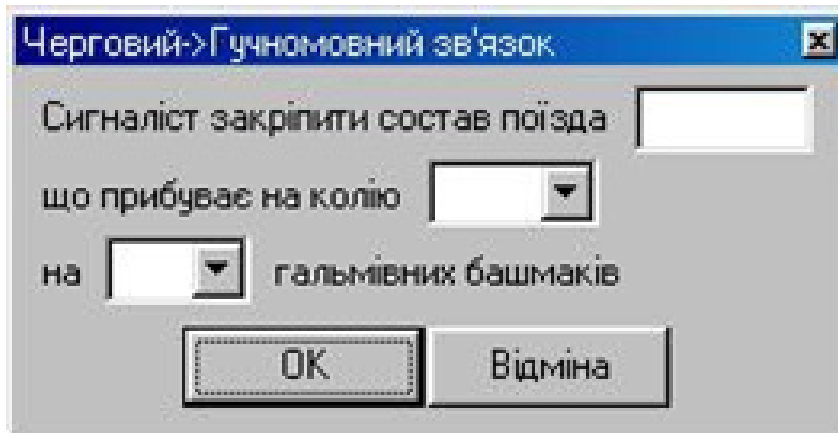


Рис. 6.4. Пример диалоговых окон тренажера ДСП:
а – входящее сообщение; *б* – окно ввода команды от ДСП

Компьютерные имитационные тренажеры являются эффективным средством обучения и тестирования персонала, связанного с управлением движением поездов. Создание и широкое применение современных тренажерных систем в комбинации с традиционными методами подготовки персонала железных дорог позволит ускорить процесс обучения, повысить его качество, сократить затраты на обучение, а также эффективно решать задачи кадрового отбора и объективной оценки профессионального уровня работников ОДП. Практическое использование разработанных в ДИИТе компьютерных тренажеров на железнодорожных станциях и в ряде учебных заведений Украины показало их высокую эффективность, что дает основания рекомендовать их к широкому применению для подготовки оперативно-диспетчерского персонала железных дорог Украины.

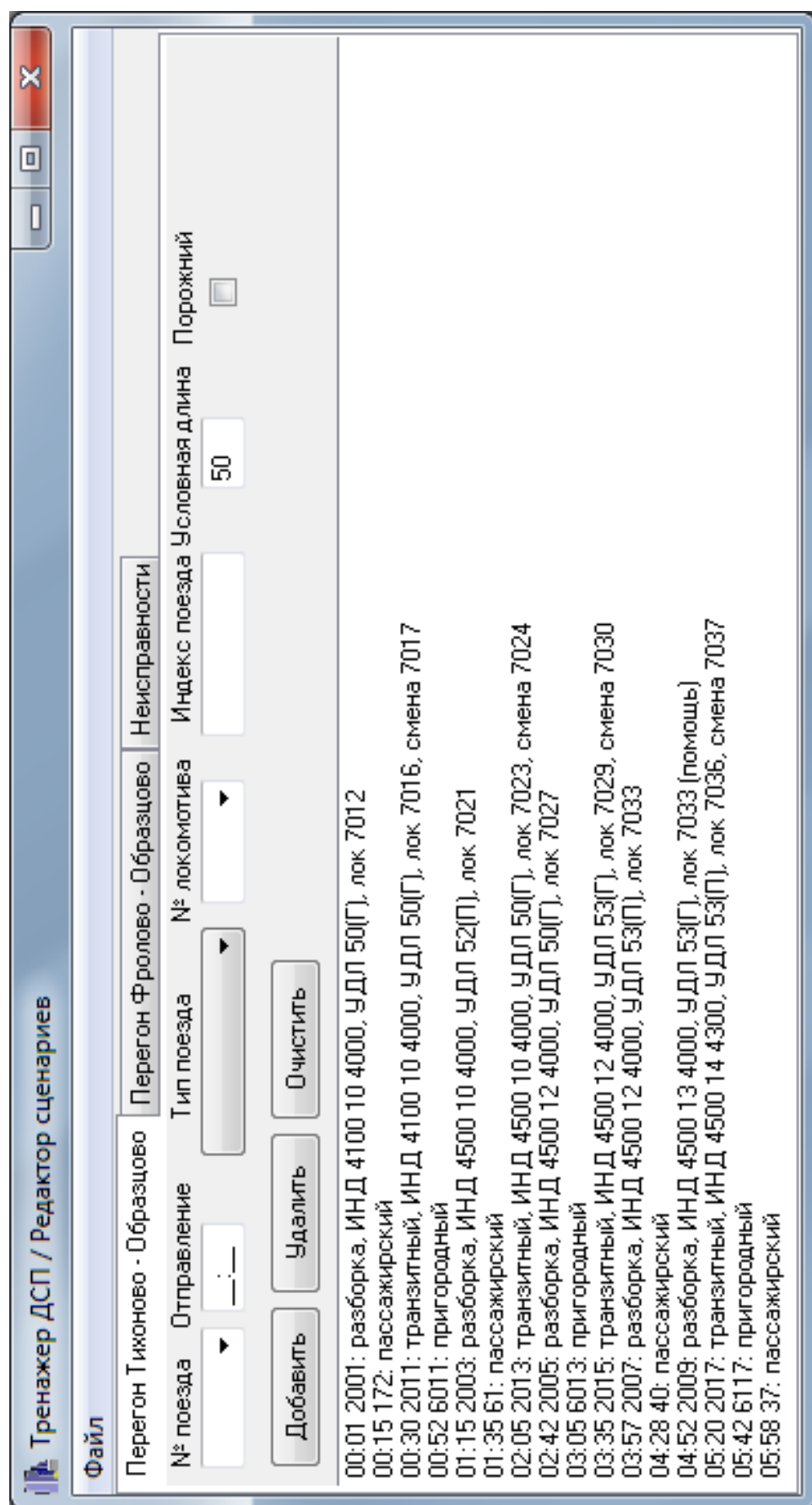


Рис. 6.5. Внешний вид окна редактора сценариев

6.4. Оценка эффективности управления станцией с использованием методов кластерного и дискриминантного анализа

6.4.1. Методика оценки уровня профессиональной подготовки ОДП с использованием имитационных тренажеров

Обычно основное внимание при создании тренажеров уделяется разработке имитатора объекта управления (станции), который включает его информационную модель и модель функционирования. Однако указанный имитатор без модели инструктора (см. рис. 6.1), обеспечивающей организацию, сопровождение и оценку тренировки, не может служить полноценным тренажером. При создании модели инструктора наибольшую трудность с методической точки зрения представляет выбор показателя для оценки проведенной тренировки, а также способа его расчета.

В существующих тренажерах оценка уровня профессиональной подготовки работника в большинстве случаев выполняется человеком-инструктором на основе анализа показателей выполненной тренировки, что снижает ее объективность [139, 157–162]. В некоторых случаях предлагаются методики расчета обобщенного показателя для оценки работы на тренажере. При этом используется система начисления штрафных или премиальных баллов за те или иные действия тренируемого [143, 152, 154, 167]. Однако в связи с многообразием и сложностью решаемых в процессе работы на тренажере задач получение единого обобщенного показателя, который бы позволял объективно оценить деятельность ОДП, весьма затруднительно. Существуют тренажеры, в которых оценку выполненной тренировки предлагается производить на основе сравнения действий тренируемого с «эталонной» моделью деятельности ОДП, являющейся составной частью модели инструктора. При этом в процессе тренировки фиксируются все допущенные ошибки (несовпадения с «эталоном»), на основе чего определяется общая оценка тренажа [62, 65, 142]. Вместе с тем формализация деятельности ОДП железнодорожного транспорта представляет собой весьма сложную задачу вследствие большого количества возможных вариантов действий работника в той или иной

ситуации, а с учетом постоянно меняющейся оперативной обстановки разработка какого-либо «эталона» с целью использования его в тренажере для оценки результатов тренировки не представляется возможной. В работе [174] для оценки уровня подготовки персонала с помощью АОС предлагается использовать методику, основанную на нечеткой логике. Для этого в состав АОС включается самообучающаяся база данных о результатах тестирования контрольной группы работников. Однако указанная методика оценки так и не получила практической реализации.

В этой связи для определения уровня профессиональной подготовки работников с использованием тренажера ДСП авторами разработана методика оценки результатов тренировки [70, 81, 171]. В процессе работы на тренажере все действия обучаемого фиксируются; по окончании тренировки рассчитывается ряд показателей, характеризующих качество управления работой станции (средний простой поездов в парке, средний простой поездов на примыкающих линиях, количество допущенных ошибок, количество обработанных объектов и др.). На основе этих показателей формируется вектор классифицирующих переменных тренируемого (объекта) $\mathbf{X}^* = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, где N – общее число показателей тренировки. Для решения поставленной задачи оценки предложено использовать методы дискриминантного анализа, которые позволяют на основе значений вектора показателей \mathbf{X}^* отнести тренируемого к той или иной квалификационной группе. Каждая такая группа включает работников с определенным уровнем профессиональной подготовки.

Дискриминантный анализ [175, 176] является методом классификации с обучением, т. е., как и в [174], предполагается наличие определенной базы уже классифицированных по группам работников (обучающей выборки). Обучающая выборка представляет собой матрицу \mathbf{S} размерностью $M \times N$, где M – объем выборки. Каждой строке матрицы (объекту выборки) поставлен в соответствие вектор

$$\mathbf{X}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iN}\}, (i = 1 \dots M, j = 1 \dots N),$$

который включает значения показателей работы на тренажере для одного из классифицированных ранее работников и может быть представлен точкой в N -мерном пространстве. При этом каждый вектор \mathbf{X}_i обучающей выборки отнесен к определенной квалификацион-

ной группе g_k ($k = 1 \dots G$, где G – общее количество групп). Первоначальная классификация работников для получения обучающей выборки S может быть выполнена с помощью методов кластерного анализа [176, 177] с учетом экспертных оценок [178].

6.4.2. Выбор показателей для оценки уровня подготовки ОДП

Выбор показателей, по которым выполняется оценка уровня подготовки работника по результатам его работы на тренажере, представляет собой весьма важную задачу. Как показывают исследования [175], с увеличением количества показателей N , используемых для классификации объектов, ее качество снижается. В этой связи среди множества показателей, которые определяются по результатам работы на тренажере ДСП, необходимо выделить подмножество наиболее значимых (информативных). Для этого следует определить показатели, значения которых значительно отличаются для групп с разным уровнем подготовки и которые играют определяющую роль при оценке уровня профессиональной обученности. Далее классификацию работника следует выполнять с учетом лишь этих показателей. При выборе информативных показателей следует также учитывать мнение экспертов в области управления движением поездов и работой станций.

Среди показателей, получаемых в результате тренировки, с помощью дисперсионного анализа и метода множественных сравнений Шеффе [179] были выделены следующие информативные показатели: средняя продолжительность обслуживания поездов на станции – T_n , средний простой поездов на соседних станциях вследствие невозможности их приема – T_n , средний простой поездов перед входным светофором – T_c , суммарное число допущенных ошибок, приходящихся на один поезд, – Z .

В процессе тренировки ДСП может допускать различные ошибки, значимость которых может существенно отличаться. В этой связи показатель Z не может быть получен простым суммированием всех допущенных ошибок. Каждая ошибка должна быть оценена определенным количеством штрафных баллов в зависимости от ее значимости. Оценка значимости ошибок может быть выполнена только

экспертным путем. С этой целью был выполнен опрос работников ревизорского аппарата и оперативно-диспетчерского персонала Приднепровской железной дороги, по результатам которого была определена значимость (по 10-бальной шкале) каждой ошибки, которая может быть допущена ДСП в процессе работы.

6.4.3. Стандартизация значений информативных показателей

Показатели, используемые для классификации, измеряются в различных единицах и имеют разные диапазоны значений. В этом случае показатели с большим размахом значений будут оказывать доминирующее влияние на результаты классификации. Методы дискриминантного и кластерного анализа предполагают, что значения всех показателей классифицируемых объектов должны иметь одни и те же единицы измерения. Поэтому требуется стандартизация значений показателей как обучающей выборки S , так и вектора X^* , используемого при классификации конкретного объекта. Стандартизация предполагает переход к некоторому единообразному описанию данных и их преобразование в безразмерные величины. Выбор метода стандартизации представляет собой достаточно сложную задачу и существенно влияет на качество классификации. Это объясняется тем, что выбор метода может существенно изменять геометрию исходного N -мерного пространства. В этой связи при разработке методики оценки результатов тренировки было выполнено исследование эффективности девяти различных методов стандартизации данных, предложенных в работах [176, 177]. Для расчета конкретных значений по каждому из рассмотренных методов используются такие формулы:

- метод 1 $X'_{i,j} = X_{i,j} / R_j$;
- метод 2 $X'_{i,j} = X_{i,j} / \sigma_j^2$;
- метод 3 $X'_{i,j} = X_{i,j} / \sigma_j$;
- метод 4 $X'_{i,j} = X_{i,j} / X_j^{\max}$;
- метод 5 $X'_{i,j} = X_{i,j} / \bar{X}_j$;
- метод 6 $X'_{i,j} = (X_{i,j} - X_j^{\min}) / \bar{X}_j$;
- метод 7 $X'_{i,j} = (X_{i,j} - X_j^{\min}) / \sigma_j^2$;

- метод 8 $X'_{i,j} = (X_{i,j} - X_j^{\min}) / \sigma_j$;
- метод 9 $X'_{i,j} = (X_{i,j} - X_j^{\min}) / R_j$.

В формулах приняты следующие обозначения: $X_{i,j}$, $X'_{i,j}$ – значения j -го показателя для i -го объекта обучающей выборки соответственно до и после стандартизации; X_j^{\min} , X_j^{\max} – соответственно минимальное и максимальное значение j -го показателя среди всех объектов выборки; σ_j^2 , \bar{X}_j , R_j – соответственно дисперсия, среднее значение и размах j -го показателя в обучающей выборке ($R_j = X_j^{\max} - X_j^{\min}$).

Указанные методы стандартизации были исследованы в сочетании с различными методами кластерного и дискриминантного анализа при классификации результатов работы на тренажере контрольной группы из 50 человек, в которую вошли 15 профессиональных ДСП и 35 студентов 4-го курса факультета «Управление процессами перевозок» ДИИТа. При этом первоначально экспертным путем была выполнена «эталонная» классификация тренируемых на три группы:

- «высокий уровень подготовки» (группа А);
- «средний уровень» (группа Б);
- «низкий уровень» (группа В).

Эффективность каждого метода стандартизации оценивалась по двум критериям: вероятности ошибочной классификации $P_{\text{ош}}$ и величине суммарной внутригрупповой дисперсии $D_{\text{гр}}$, которая определяет величину разброса значений отдельных показателей в квалификационных группах g_k после классификации. Критерий $P_{\text{ош}}$ для каждого метода стандартизации определялся на основе сравнения результатов классификации, полученных с использованием данного метода, с «эталоном».

Для выполнения исследований были разработаны соответствующие программы, реализующие на ЭВМ различные алгоритмы дискриминантного и кластерного анализа. Исследования показали, что наилучшие результаты получены при стандартизации данных по методу 4 – стандартизация на максимум. При этом вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ в зависимости от метода классификации составила 0,03...0,05, а величина внутригрупповой дисперсии $D_{\text{гр}}$ принимала существенно меньшие значения, чем при использовании других методов

стандартизации данных. Наихудшие результаты получены при стандартизации данных по методам 2 и 7, использование которых сильно искажает геометрию исходного N -мерного пространства, что обуславливает высокую степень вероятности ошибочной классификации 0,30...0,40.

6.4.4. Получение обучающей выборки методами кластерного анализа

Кластерный анализ представляет собой способ группировки (классификации) многомерных объектов, основанный на представлении результатов отдельных наблюдений точками подходящего геометрического пространства с последующим выделением групп (кластеров) этих точек (рис. 6.6). При этом каждый объект характеризуется вектором параметров (показателей) $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_N\}$.

Задача методов кластерного анализа – выделить в исходных многомерных данных такие однородные пространства, чтобы объекты внутри группы были «похожи» в определенном смысле друг на друга, а объекты из разных групп – «не похожи». В данном случае под «похожестью» понимается близость объектов в многомерном пространстве. Кластерный анализ, в отличие от дискриминантного, представляет собой метод классификации без обучения

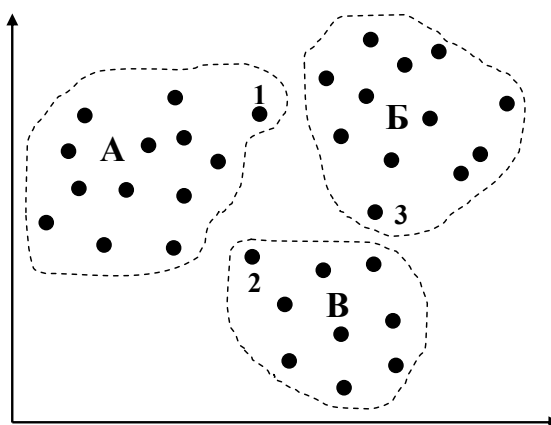


Рис. 6.6. Графическая интерпретация группировки объектов в кластеры

[177]. Методы кластерного анализа были использованы для получения исходной обучающей выборки \mathbf{S} (см. п. 6.4.1), которая является базой данных при оценке методами дискриминантного анализа уровня профессиональной подготовки конкретного работника по результатам его работы на тренажере ДСП. С этой целью был проведен ряд занятий на тренажере с контрольной группой из 50 человек с разным уровнем профессиональной подготовки (см. п. 6.4.3).

Для решения задачи получения обучающей выборки S из множества существующих алгоритмов кластерного анализа [176, 177] были выбраны и исследованы алгоритмы прямой классификации, т. к. они ориентированы на выделение кластеров с заранее заданными свойствами, что соответствует условиям поставленной задачи. Кроме того, по сравнению с другими, алгоритмы прямой классификации имеют ряд преимуществ, к которым следует отнести простоту и ясность классификации, а также невысокую трудоемкость. Алгоритмы прямой классификации можно разделить на агломеративные (стратегия объединения кластеров) и дивизивные (стратегия разделения).

В агломеративных алгоритмах каждый классифицируемый объект в начале классификации представляет собой отдельный кластер. На каждом шаге алгоритма происходит объединение двух наиболее близких кластеров. Это происходит до тех пор, пока число кластеров не достигнет определенного, в большинстве случаев заранее заданного значения k . В дивизивных алгоритмах все объекты в начале относятся к одному кластеру. Далее исходная совокупность постепенно разделяется до тех пор, пока не будет получена желаемая степень разделения (достигнуто заданное количество кластеров k). Дивизивные алгоритмы целесообразно применять, когда исходную совокупность необходимо разделить на достаточно большое количество кластеров (более 10) [177], что не соответствует условиям задачи классификации работников по результатам работы на тренажере. Кроме того, дивизивные алгоритмы достаточно неустойчивы при классификации «спорных» объектов, находящихся на границах кластеров (объекты 1, 2, 3 на рис. 6.6). В этой связи для выбора наиболее эффективного метода получения исходной обучающей выборки было выполнено исследование только агломеративных алгоритмов.

При классификации существенную роль играет также выбор меры различия между отдельными объектами. Мера различия между двумя объектами a и b представляет собой величину (расстояние) d_{ab} , которая тем больше, чем меньше сходство объектов a и b . При выборе метода классификации для получения обучающей выборки выполнено сравнение четырех мер различия с целью определения наиболее подходящей для решения поставленной задачи [176, 177]. Приведем формулы для расчета значений d_{ab} для каждой из рассмотренных мер различия:

1. Эвклидова мера $d_{ab} = \sqrt{\sum_j^N (x_{aj} - x_{bj})^2}$.
2. Манхэттенская мера $d_{ab} = \sum_j^N |x_{aj} - x_{bj}|$.
3. Брея-Кертиса мера $d_{ab} = \frac{\sum_j^N |x_{aj} - x_{bj}|}{\sum_j^N x_{aj} + \sum_j^N x_{bj}}$.
4. Канберровская мера $d_{ab} = \sum_j^N \frac{|x_{aj} - x_{bj}|}{|x_{aj}| + |x_{bj}|}$.

Здесь x_{aj} , x_{bj} представляют собой значения j -го показателя для объектов a и b соответственно ($x_{aj} \in \mathbf{X}_a$, $x_{bj} \in \mathbf{X}_b$, $j = 1 \dots N$).

Для выбора наиболее эффективной меры различия с помощью ЭВМ был выполнен их сравнительный анализ при классификации данных о результатах тренировки контрольной группы (см. п. 6.4.3). Эффективность каждой меры различия оценивалась по вероятности ошибочной классификации $P_{\text{ош}}$ и величине суммарной внутригрупповой дисперсии $D_{\text{гр}}$. Исследования эффективности мер различия при формировании обучающей выборки методами кластерного анализа показали, что наилучшее качество классификации результатов работы на тренажере получено при использовании Канберровской меры ($P_{\text{ош}} = 0,04 \dots 0,06$). Данная мера различия также оказалась наиболее устойчива при классификации «спорных» объектов. Наихудшие результаты получены при расчете расстояний между объектами с использованием Манхэттенской меры ($P_{\text{ош}} = 0,25 \dots 0,30$).

Как отмечалось, агломеративные алгоритмы кластерного анализа предполагают постепенное объединение кластеров, пока их количество не достигнет заданного значения. На каждом шаге агломеративного алгоритма объединяются два кластера, расстояние между которыми минимально. При этом возникает проблема определения расстояний между отдельными кластерами. Способ расчета этого расстояния определяется принятой стратегией объединения.

Пусть имеются две группы объектов (кластеры) U и V , количество элементов в которых составляет n_u и n_v соответственно; расстояние между этими кластерами d_{uv} . Допустим, что d_{uv} – это минимальное среди всех возможных расстояний между всеми остальными кластерами. В этом случае кластеры U и V объединяются в один кластер W с количеством элементов $n_w = n_u + n_v$. Рассмотрим некоторый кластер Y , который включает n_y элементов. Если перед объединением кластеров U и V известны расстояния d_{uy} и d_{vy} , то расстояние между новым кластером W и кластером Y составит:

$$d_{wy} = \alpha_u d_{uy} + \alpha_v d_{vy} + \beta d_{uv} + \gamma |d_{uy} - d_{vy}|, \quad (6.1)$$

где $\alpha_u, \alpha_v, \beta, \gamma$ – параметры, определяющие сущность стратегии объединения.

При определении наиболее эффективного алгоритма классификации при получении обучающей выборки выполнено исследование шести стратегий объединений [176]. Приведем параметры для определения расстояний d_{wy} (6.1) между отдельными кластерами для таких стратегий объединения:

1. «Ближнего соседа» $\alpha_u = \alpha_v = 0,5, \beta = 0, \gamma = 0,5$;
2. «Дальнего соседа» $\alpha_u = \alpha_v = 0,5, \beta = 0, \gamma = 0,5$;
3. «Группового среднего» $\alpha_u = n_u/n_w, \alpha_v = n_v/n_w, \beta = \gamma = 0$;
4. «Центроидная» $\alpha_u = n_u/n_w, \alpha_v = n_v/n_w, \beta = -\alpha_u \alpha_v, \gamma = 0$;
5. «Квадратичная» $\alpha_u = (n_u + n_y)/(n_w + n_y), \alpha_v = (n_v + n_y)/(n_w + n_y),$
 $\beta = -n_w/(n_w + n_y), \gamma = 0$;
6. «Гибкая» $\alpha_u = \alpha_v = 0,625, \beta = -0,25, \gamma = 0$;

Сравнительный анализ применения указанных стратегий для классификации результатов тренировок контрольной группы (см. п. 6.4.3) показал, что наиболее близкие результаты к «эталонной» обучающей выборке были получены при использовании «гибкой» стратегии объединения (4...6 % ошибок при классификации). Худшие результаты получены при использовании стратегий «ближнего» и «дальнего» соседа (35...40 % ошибок).

Таким образом, для получения обучающей выборки при классификации результатов работы на тренажере ДСП целесообразно

использовать алгоритм кластерного анализа, основанный на «гибкой» стратегии объединения; при этом расстояния между отдельными объектами следует определять с помощью Канберровской меры различия. Вместе с тем обучающая выборка, полученная с помощью методов кластерного анализа, является в определенной степени только рекомендацией, поскольку ее окончательное формирование необходимо осуществлять с учетом экспертных оценок соответствующих специалистов. Следует отметить, что подобные выборки должны быть получены для различных начальных условий тренировки, которые в значительной степени определяют ее итоговые результаты. Применение разработанной методики позволяет автоматизировать и существенно ускорить процесс формирования таких баз данных.

6.4.5. Оценка результатов тренировки с помощью методов дискриминантного анализа

Для непосредственной оценки уровня профессиональной подготовки тренируемого на основе результатов его работы на тренажере в разработанной методике используется метод дискриминантного анализа. Сущность метода заключается в том, что вектор классифицирующих переменных $\mathbf{X}^* = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ тренируемого (см. п. 6.4.1) используется для классификации его к одной из групп ранее оцененных работников, данные о которых содержатся в базе данных тренажера. При этом оцениваемый работник относится к той квалификационной группе g_i ($i=1\dots G$, где G – общее количество групп), для которой значение дискриминантной функции нормального распределения обращается в максимум [70, 175, 176]:

$$f_i(\mathbf{X}^*) = (2\pi)^{-N/2} (\det \mathbf{S}_i)^{-1/2} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left[(\mathbf{X}^* - \mathbf{m}_i) \mathbf{S}_i^{-1} (\mathbf{X}^* - \mathbf{m}_i)' \right] \right\} \rightarrow \rightarrow \max, (6.2)$$

где \mathbf{m}_i – вектор математических ожиданий параметров x_1, x_2, \dots, x_N для i -й квалификационной группы;

$\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_i^{-1}$ – соответственно ковариационная и обратная ей матрицы размерностью $N \times N$ для i -й группы.

Следует отметить, что аппроксимация данных в группах с помощью нормального закона является допущением, т. к. истинный закон распределения в большинстве случаев неизвестен. Вместе с тем, как показали исследования [175], аппроксимация неизвестного закона распределения нормальным дает вполне приемлемые результаты классификации. При этом истинные значения параметров в общем случае неизвестного распределения математического ожидания $\boldsymbol{\mu}_i$ и ковариационной матрицы $\boldsymbol{\Sigma}_i$ заменяются их оценками \mathbf{m}_i и \mathbf{S}_i , вычисленными по данным i -й группы. Однако с ростом объема обучающей выборки отклонение оценок \mathbf{m}_i и \mathbf{S}_i от $\boldsymbol{\mu}_i$ и $\boldsymbol{\Sigma}_i$ уменьшается, что приводит к повышению качества классификации.

Как показали исследования, выполненные по результатам работы на тренажере ДСП группы студентов ДИИТа, методика оценки уровня их подготовки, основанная на (6.2), часто приводит ошибочной классификации (вероятность ошибки – 0,20...0,25). Кроме того, дискриминантная функция нормального распределения $f_i(\mathbf{X}^*)$ достаточно плохо классифицирует «спорные» объекты, находящиеся на границах групп.

В этой связи было выполнено исследование возможности использования для оценки результатов тренировки линейной дискриминантной функции Фишера [175, 176]. Как известно, если все группы g_i , среди которых выполняется классификация объекта \mathbf{X}^* , имеют статистически одинаковую ковариационную матрицу \mathbf{S} , то выражение (6.2) может быть представлено в виде линейной функции

$$\left. \begin{aligned} h_i(\mathbf{X}^*) &= (\mathbf{X}^* \boldsymbol{\gamma}_i) \lambda_i \rightarrow \max, \\ \text{где } \boldsymbol{\gamma}_i &= \mathbf{S}^{-1} \mathbf{m}_i, \quad \lambda_i = 0,5(\mathbf{m}_i \mathbf{S}^{-1} \mathbf{m}_i'). \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

Линейная функция Фишера имеет ряд преимуществ по сравнению с (6.2), так как вследствие своей линейности и большей надежности оценок ковариационных матриц дает меньшую погрешность при классификации.

Один из методов дискриминантного анализа – метод коалиций [176] – предусматривает объединение тех групп g_i , у которых

ковариационные матрицы статистически равны, в так называемые коалиции. Данные групп, входящих в одну коалицию, объединяются, и по ним вычисляется общая ковариационная матрица S . Далее классификация объекта X^* производится по максимуму линейной дискриминантной функции Фишера (6.3). Гипотеза о равенстве ковариационных матриц различных групп g_i проверяется по методу Бокса [176] или Бартлетта–Андерсона [175, 179].

Выполненные исследования показали, что линейная функция Фишера при оценке результатов работы на тренажере ДСП показывает достаточно низкий уровень ошибочной классификации (5...7 %) и более устойчива при классификации «спорных» объектов.

Как отмечалось выше, дискриминантный анализ является методом классификации с обучением. Это значит, что обучающая выборка может постоянно обновляться и увеличивать свой объем за счет данных об объектах, которые были правильно классифицированы. Такая организация также допускает возможность корректировки ошибочной классификации. Так, при выявлении подобной ошибки инструктор, который руководит проведением занятий на тренажере, может откорректировать полученную тренируемым оценку и записать значения показателей его работы в нужную квалификационную группу в обучающей выборке. Таким образом, с ростом объема обучающей выборки вероятность ошибки при классификации уменьшается.

Необходимо отметить, что оценка профессиональных качеств работника по результатам его работы на тренажере, полученная с применением разработанной методики, не может и не должна рассматриваться как окончательная, а является лишь рекомендацией для лица, принимающего решение об уровне квалификации данного работника.

Приведенная методика оценки результатов тренировки была реализована в разработанных тренажерах ДСП и подтвердила свою эффективность при практическом использовании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174-р [Текст] // Урядовий кур'єр. – 2010. – 22 груд. – № 240.
2. Ветухов, Е. А. Определение уровня загрузки станций методом моделирования их работы на ЭЦВМ [Текст] / Е. А. Ветухов, Е. А. Сотников // Железнодорожный трансп. – 1969. – № 7. – С. 34–37.
3. Шабалин, Н. Н. Моделирование процессов массового обслуживания на станциях [Текст] / Н. Н. Шабалин // Железнодорожный трансп. – 1971. – № 5. – С. 64–65.
4. Персианов, В. А. Моделирование транспортных систем [Текст] / В. А. Персианов, К. Ю. Скалов, Н. С. Усков. – Москва : Транспорт, 1972. – 208 с.
5. Таль, К. К. Основные вопросы применения методов моделирования при проектировании станции и узлов [Текст] / К. К. Таль // Межвуз. сб. науч. тр. – Москва : ЦНИИС, 1971. – Вып. 47. – С. 56–96.
6. Таль, К. К. О классификации методов моделирования, используемых для расчета станций и узлов [Текст] / К. К. Таль // Вопр. проектирования и расчета железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : ЦНИИС, 1976. – Вып. 90. – С. 74–90.
7. Руководство по расчету станций методом моделирования на ЕС ЭВМ [Текст] / ЦНИИС. – Москва, 1984. – 110 с.
8. Федотова, Т. Н. Статистическое моделирование работы сортировочных станций на ЭВМ [Текст] / Т. Н. Федотова // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1978. – С. 60–67.
9. Федотова, Т. Н. Имитация работы парков сортировочной станции на ЭВМ [Текст] / Т. Н. Федотова // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1978. – С. 68–72.
10. Федотова, Т. Н. Моделирование транспортных систем с приоритетами [Текст] / Т. Н. Федотова // Вопросы проектирования железнодорожных станций : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1978. – Вып. 589. – С. 97–107.

11. Федотов, Н. И. Расчет пропускной и перерабатывающей способности станций [Текст] / Н. И. Федотов, В. С. Бровченко, Т. Н. Федотова. – Новосибирск : НИИЖТ, 1985. – 46 с.
12. Федотов, В. А. Определение продолжительности простоя вагонов на станции в ожидании обслуживания методом моделирования на ЭВМ [Текст] / В. А. Федотов // Применение математических методов и ЭВМ в эксплуатации железных дорог : сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1975. – Вып. 497. – С. 143–149.
13. Пилипченко, П. А. Структурное моделирование работы сортировочной станции [Текст] / П. А. Пилипченко // Применение математических методов и ЭВМ в эксплуатации железных дорог : сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1975. – Вып. 497. – С. 60–61.
14. Поттгофф, Г. Теория массового обслуживания [Текст] / Г. Поттгофф. – Москва : Транспорт, 1979. – 144 с.
15. Быкадоров, А. В. Парк приема сортировочной станции как двухфазная система массового обслуживания [Текст] / А. В. Быкадоров // Сб. тр. НИИЖТа. – 1973. – № 146. – с.63–80.
16. Падня, В. А. Применение теории массового обслуживания на транспорте [Текст] / В. А. Падня. – Москва : Транспорт, 1968. – 208 с.
17. Покавкин, В. А. Нормирование показателей работы и загрузки устройств сортировочных станций [Текст] / В. А. Покавкин // Железнодорожный трансп. – 1972. – № 11. – С. 14–17.
18. Лещинский, Е. И. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте [Текст] / Е. И. Лещинский. – Москва : Транспорт, 1977. – 176 с.
19. Дятлов, Н. В. Стохастическая сеть базовых систем обслуживания для моделирования работы участковых станций [Текст] / Н. В. Дятлов // Совершенствование управления процессами перевозок на железнодорожном транспорте : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1982. – Вып. 716. – С. 83–87.
20. Тютюнов, Ю. П. Исследование технологии работы железнодорожных узлов методом имитационного моделирования [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Ю. П. Тютюнов; БелГУТ. – Гомель, 1995. – 16 с.
21. Негрей, В. Я. Вероятностно-статистический принцип расчета транспортных систем [Текст] / В. Я. Негрей, Н. П. Негрей // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1984. – С. 15–23.
22. Bryniarska, Z. Some generalizations of the model of classification yard reliability / Z. Bryniarska // Bull. Appl. Math. – 1987. – 49. – P. 167–175.
23. Сотников, Е. А. Интенсификация работы сортировочных станций [Текст] / Е. А. Сотников. – Москва : Транспорт, 1979. – 239 с.
24. Грунтов, П. С. Решение практических задач с помощью моделирования работы станций [Текст] / П. С. Грунтов, В. А. Захаров // Железнодорожный трансп. – 1979. – № 1. – С. 22–25.

25. Грунтов, П.С. Прогнозирование работы сортировочных станций методом моделирования на ЭВМ [Текст] / П. С. Грунтов, В. А. Захаров. – Гомель, 1981. – 152 с.
26. Грунтов, П. С. Эксплуатационная надежность станций [Текст] / П. С. Грунтов. – Москва : Транспорт, 1986. – 247 с.
27. Козлов, И. Т. Пропускная способность транспортных систем [Текст] / И. Т. Козлов. – Москва : Транспорт, 1985. – 214 с.
28. Миркин, А. Г. Расчет прогнозных показателей работы сортировочной станции в изменяющихся условиях эксплуатации с использованием имитационного моделирования [Текст] / А. Г. Миркин // Вестн. ВНИИЖТа. – 1990. – № 3. – С. 7–10.
29. Ивницкий, В. А. Оперативный анализ работы и нормирование простоев на станции с использованием имитационного моделирования [Текст] / В. А. Ивницкий, А. Г. Миркин // Вестн. ВНИИЖТа. – 1990. – № 7. – С. 7–10.
30. Козлов, П. А. Универсальная имитационная система транспорта ИСТРА [Текст] / П. А. Козлов // Организация работы транспорта промышленных предприятий : межвуз. сб. – Калинин : Изд-во КГУ, 1984. – С. 41–53.
31. Моделирование железнодорожных станций с помощью системы ИСТРА [Текст] / П. А. Козлов, А. Э. Александров, А. Ю. Фрейберг и др.; УрГУПС. – Екатеринбург, 2000. – 41 с
32. Жук, Е. Имитационное моделирование работы сортировочной станции при составлении графика движения поездов [Текст] / Е. Жук // Вестн. ВНИИЖТа. – 1995 – № 3 – С. 45–46.
33. Ульяненкова, Н. В. Современные тенденции рационального использования технического оснащения грузовой станции [Текст] / Н. В. Ульяненкова, В. В. Храбров // Транспорт: наука, техника, управление / ВИНТИ. – 1999. – № 5 – С. 65–66.
34. Нагорный, Е. В. Моделирование технологического процесса обработки вагонов, информации и перевозочных документов экспортно-импортного вагонопотока по прибытию на передаточных пограничных станциях [Текст] / Е. В. Нагорный, Т. В. Бутько, Н. Ф. Титов // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті : міжвуз. зб. наук. пр. / ХарДАЗТ. – 1998. – Вип. 33. – С. 125–129.
35. Мкртычян, Д. И. Моделирование и оптимизация режима работы сортировочной станции с транзитными вагонами без переработки [Текст] / Д. И. Мкртычян, К. П. Долбня // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2007. – № 6/2 (30). – С. 51–54.
36. Бутько, Т. В. Оцінка технічного рівня й ефективності роботи сортувальних станцій [Текст] / Т. В. Бутько, Г. М. Сіконенко, Р. Ш. Рустамов // Залізн. трансп. України. – 2002. – № 6 – С. 15–17.
37. Ломотько, Д. В. Математична модель функціонування пункту комерційного огляду вагонів [Текст] / Д. В. Ломотько, М. М. Кузнецов, К. В. Таратушка // Залізн. трансп. України. – 2006. – № 5 – С. 37–38.

38. Тугай, Г. А. Функциональное описание работы грузовой станции с крупными разгрузочными комплексами [Текст] / Г. А. Тугай, В. А. Бойко, М. В. Помазков // Вестн. Приазов. гос. ун-та. – 2004. – Вып. 14. – С. 328–331.
39. Федюшин, Ю. М. Применение сетей Петри для моделирования процессов управления на железнодорожном транспорте [Текст] / Ю. М. Федюшин // Информ.-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 3, 4. – С. 7–12.
40. Загарий, Г. И. Моделирование процесса перевозок на железных дорогах Украины с помощью расширенных сетей Петри [Текст] / Г. И. Загарий, Ю. М. Федюшин // Информ.-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1997. – № 4. – С. 52–56.
41. Нагорный, Е. В. Моделирование функционирования комплекса «Сортировочная станция – прилегающие участки» с помощью сетей Петри [Текст] / Е. В. Нагорный, Е. С. Алешинский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2000. – № 2. – С. 98–103.
42. Нагорний, Є. В. Економіко-математична модель функціонування логістичного ланцюга транспортного комплексу "Сортувальна станція – прилеглі ділянки" [Текст] / Є. В. Нагорний, Є. С. Альошинський // Зб. наук. пр. ХарДАЗТ. – 2000. – Вип. 42. – С. 51–57.
43. Луханін, М. І. Удосконалена модель підсистеми розформування поїздів на сортувальній станції [Текст] / М. І. Луханін, В. С. Селецький // Информ.-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2000. – № 8. – С. 71–74.
44. Bartkevicius, S. Train traffic simulation with coloured Petri Nets and schedule optimization / S. Bartkevicius, V. Bagdonos // Elektron ir elektrotech. – 2005. – № 3. – P. 18–23.
45. Paliulis, E. Modeling of railway nets with coloured Petri Nets / E. Paliulis, R. Pranevicius // Transport Means 2004 : Proceeding of the International Conference, Kaunas, Oct. 28-29, 2004. – Kaunas : Technologija, 2004. – P. 39–43.
46. Malavasi, G. La modellazione dell'esercizio ferroviario attraverso le Reti di Petri / G. Malavasi, S. Ricci // Ing. Ferroviaria. – 2005. – № 3 – S. 205–219.
47. Панков, С. В. Моделирование суточного плана-графика станции на основе сетей Петри [Текст] / С. В. Панков // Вестн. инженеров-электромех. ж.-д. трансп. СамГАПС. – 2003. – № 1. – С. 194–198.
48. Прохорченко, А. В. Розроблення моделі формування плану роботи сортувальної станції на основі теорії розкладу [Текст] / А. В. Прохорченко, В. М. Прохоров, А. Ю. Постоленко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2011. – № 120. – С. 38–43.
49. Сукач, Е. И. Стенд имитационного моделирования сортировочной станции железнодорожной сети [Текст] / Е. И. Сукач // Проблеми програмування. – 2009. – № 3. – С. 81–89.

50. Рахмангулов, А. Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе Anylogic [Текст] / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкuroв // Сб. науч. тр. SWorld. Матер. междунар. научно-практ. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании–2012». – Одесса : Куприенко. – 2012. – Вып. 4, т. 2. – С. 7–13.
51. Шафит, Е. М. Алгоритмизация процесса управления роспуском составов на сортировочных горках [Текст] / Е. М. Шафит // Вопр. механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Москва : Транспорт, 1966. – Вып. 63/4. – С. 43–62.
52. Муха, Ю. А. Моделирование на ЭЦВМ процесса скатывания отцепов с сортировочной горки [Текст] / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Вопр. механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1969. – Вып. 90/6. – С. 53–63.
53. Муха Ю. А. Имитационное моделирование процесса скатывания отцепов при выполнении горочных расчетов [Текст] / Ю. А. Муха, А. А. Муратов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск : ДИИТ, 1990. – С. 11–20.
54. Жуковицкий, И. В. Решение дифференциального уравнения свободного скатывания отцепа с горки [Текст] / И. В. Жуковицкий // Информ.-управляющие системы на ж.-д. трансп. – 1997. – № 4. – С. 14–17.
55. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко и др. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2010. – 260 с.
56. Орловский, П. Н. Об аналитических методах расчета задержек подвижного состава у пересечений маршрутов следования поездов в узлах [Текст] / П. Н. Орловский // Вопр. механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1975. – Вып. 160/8. – С. 115–121.
57. Вернигора, Р. В. Дослідження ефективності технології формування двогрупних поїздів в оперативних умовах з використанням імітаційної моделі роботи залізничного напрямку [Текст] / Р. В. Вернигора, О. О. Мазуренко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехн. ін-т» – 2011. – № 53. – С. 89–95.
58. Вернигора, Р. В. Дослідження процесів составоутворення на сортувальних станціях методами імітаційного моделювання [Текст] / Р. В. Вернигора, О. В. Пугач // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2010. – № 6/4. – С. 52–55.
59. Кокурин, И. М. Улучшение условий труда дежурных по станции при МРЦ [Текст] / И. М. Кокурин // Железнодорожный трансп. – 1974. – № 6. – С. 32–35.
60. Кокурин, И. М. Методика количественной оценки деятельности человека-оператора железнодорожных автоматизированных систем управления [Текст] / И. М. Кокурин // Межвуз. сб. науч. тр. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1977. – Вып. 404. – С. 73–83.

61. Кокурин, И. М. Формализация расчета загрузки железнодорожных операторов [Текст] / И. М. Кокурин // Вестн. ВНИИЖТа. – 1983. – № 5. – С. 51–54.
62. Титов, Е. В. Разработка тренажера для подготовки поездных диспетчеров [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / Е. В. Титов; МИИТ. – Москва, 1990. – 25 с.
63. Сапунов, Н. А. Улучшить подготовку дежурных по станциям [Текст] / Н. А. Сапунов, А. И. Кожевников, А. С. Столяров // Железнодорожный трансп. – 1997. – № 1. – С. 16–19.
64. Сапунов, Н. А. Об оценке количества информации в системе управления сортировочной станцией [Текст] / Н. А. Сапунов // Межвуз. сб. науч. тр. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1973. – Вып. 364. – С. 80–91.
65. Прашил, Я. Имитационная модель работы дежурного по промежуточной станции [Текст] / Я. Прашил, Л. Садлонь // Совершенствование управления процессами перевозок на ж.-д трансп. : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1982. – Вып. 716. – С. 120–127.
66. Федотов, Н. И. Исследование транспортных операций. Ч. 2. Математическое моделирование транспортных систем [Текст] / Н. И. Федотов. – Новосибирск : НИИЖТ, 1978. – 95 с.
67. Графический расчет станции на БЭСМ-4 методом моделирования [Текст] // Метод. указания по проектированию ж.-д. узлов и станций. – Киев : Киевгипротранс, 1976. – 31 с.
68. Бобровський, В. І. Теоретичні основи удосконалення конструкції та технології роботи залізничних станцій [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. І. Бобровський; ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2002. – 36 с.
69. Бобровский, В. И. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно-диспетчерского персонала [Текст] / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора // Математичне моделювання. – 2000. – № 2(5). – С. 68–71.
70. Бобровский, В. И. Повышение качества обучения оперативно-диспетчерского персонала железнодорожных станций с использованием компьютерных тренажеров [Текст] / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора // Зб. наук. пр. КУЕТТ. Сер. «Транспортні системи і технології». – Київ : КУЕТТ, 2003. – Вип. 3. – С. 54–61.
71. Бобровский, В. И. Моделирование системы управления пропуском поездов через пересечения [Текст] / В. И. Бобровский // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізн. трансп. : міжвуз. зб. наук. пр. – Харків : ХарДАЗТ, 1998. – Вип. 33. – С. 71–79.
72. Бобровский, В. И. Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле [Текст] / В. И. Бобровский // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізн. трансп. : міжвуз. зб. наук. пр. – Харків : ХарДАЗТ, 1999. – Вип. 38. – С. 35–42.

73. Бобровский, В. И. Эргатические модели сортировочных горок [Текст] / В. И. Бобровский // Информ.-управляющие системы на ж.-д. трансп. – 2001. – № 5. – С. 7–11.
74. Бобровский, В. И. Имитационное моделирование роспуска составов в тренажерах горочных операторов [Текст] / В. И. Бобровский // Информ.-управляющие системы на ж.-д. трансп. – 2001. – № 4. – С. 112.
75. Бобровский, В. И. Эргатические модели железнодорожных станций [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Зб. наук. пр. КУЕТТ. Сер. «Транспортні системи і технології». – Київ : КУЕТТ, 2004. – Вип. 5. – С. 80–86.
76. Бобровський, В. І. Базова модель колійного розвитку в імітаційних моделях залізничних станцій [Текст] / В. І. Бобровський, Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. Сер. «Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України». – Харків : УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 62. – С. 20–25.
77. Бобровский, В. И. Техничко-економическое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2004. – № 6. – С. 17–21.
78. Бобровский, В. И. Количественная оценка технико-технологических параметров железнодорожных станций на основе эргатических моделей [Текст] / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин // Вісн. ДНУЗТ. – 2007. – № 16. – С. 50–57.
79. Bobrovskiy, V. I. Researching operation of the railway stations with using of their ergatic simulation models / V. I. Bobrovskiy, D. N. Kozachenko, R. V. Vernigora // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2013. – Вип. 5. – С. 67–72.
80. Bobrovskiy, V. I. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata / V. I. Bobrovskiy, D. N. Kozachenko, R. V. Vernigora // Transport Problems / The Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, Poland. – 2014. – Vol. 9, Iss. 3. – P. 57–66.
81. Вернигора, Р. В. Підвищення ефективності функціонування залізничних станцій як ергатичних систем [Текст] : автореф. дис. ...канд. техн. наук / Р. В. Вернигора; ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2008. – 24 с.
82. Малашкін, В. В. Удосконалення методів техніко-технологічної оцінки залізничних станцій з метою підвищення ефективності їх функціонування [Текст] : автореф. дис. ...канд. техн. наук. / В. В. Малашкін; ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2012. – 24 с.
83. Конюхова, Р. А. Метасистемная модель сортировочной станции [Текст] / Р. А. Конюхова, Т. И. Коршунова, А. М. Пищухин // Железнодорожный трансп. – 2004. – № 10. – С. 49–51.

84. Вернигора, Р. В. Моделирование работы систем станционной автоматики в эргатических имитационных моделях железнодорожных станций [Текст] / Р. В. Вернигора, Н. И. Березовый, В. В. Малашкин // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2011. – Вип. 2. – С. 31–37.
85. Таль, К. К. Методика расчета соединений путей на ЭВМ [Текст] / К. К. Таль, Л. Ф. Пономарева // Вопр. проектирования железных дорог : сб. науч. тр. ЦНИИС. – Москва : Транспорт, 1967. – Вып. 63. – С. 142–156.
86. Мирошниченко, В. М. О машинном представлении схем крупных железнодорожных станций [Текст] / В. М. Мирошниченко // Кибернетика и транспорт. – Москва : Наука, 1968. – С. 178–206.
87. Алаев, М. М. Формализация элементов схем станций для расчетов на ЭВМ [Текст] / М. М. Алаев // Проблемы наращивания мощности станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1985. – Вып. 765. – С. 58–59.
88. Корешков, В. Н. Способ представления схемы сортировочной станции в ЭВМ [Текст] / В. Н. Корешков // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Гомель : БелИИЖТ, 1985. – С. 91–96.
89. Головнич, А. К. Автоматизированное проектирование железнодорожных станций [Текст] / А. К. Головнич. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 202 с.
90. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций [Текст] : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2010. – 156 с.
91. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – Москва : Сов. радио, 1972. – 552 с.
92. Трахтенбрат, Б. А. Конечные автоматы [Текст] / Б. А. Трахтенбрат. – Москва : Наука, 1970. – 400 с.
93. Муха, Ю. А. Исследование распределения работы между тормозными позициями при регулировании скорости скатывания отцепов на автоматизированной сортировочной горке [Текст] / Ю. А. Муха, А. М. Бледный, В. И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск : ДИИТ, 1978. – Вып. 197/12. – С. 15–24
94. Бледный, А. М. Экспериментальная оценка качества интервального и прицельного регулирования скорости движения отцепов на сортировочной горке, оборудованной системой АРС ГТСС [Текст] / А. М. Бледный, В. И. Бобровский // Вопр. механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск : ДИИТ, 1983. – Вып. 229/15. – С. 48–59.
95. Скорости соударения отцепов и окна, образующиеся на путях сортировочного парка [Текст] / Ю. А. Муха, В. З. Яневич, В. И. Бобровский, А. М. Бледный // Вопр. механизации и автоматизации сортировочного про-

- цесса на железнодорожных станциях : тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1975. – Вып. 160/8. – С. 98–102.
96. Методичні вказівки з розрахунку норм часу на маневрові роботи, які виконуються на залізничному транспорті [Текст] / Затв. наказом Укрзалізниці № 072/ЦЗ від 25.03.2003. – Київ : Укрзалізниця, 2003. – 82 с.
97. Иглхарт, Д. Л. Регенеративное моделирование сетей массового обслуживания [Текст] : пер. с англ. / Д. Л. Иглхарт, Д. С. Шедлер. – Москва : Радио и связь, 1984. – 136 с.
98. Калашников, В. В. Организация исследования сложных систем на базе агрегативного подхода к моделированию [Текст] / В. В. Калашников // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – № 2. – С. 92–108.
99. Крэйн, М. Введение в регенеративный метод анализа моделей [Текст] / М. Крэйн, О. Лемуан; под ред. В.В. Калашникова; пер. с англ. Н. Я. Ривеса. – Москва : Наука, 1982. – 104 с.
100. Малашкін, В. В. Дослідження ефективності методу регенеративного аналізу при ергатичному моделюванні роботи залізничних станцій [Текст] / В. В. Малашкін, Р. В. Вернигора, М. І. Березовий // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2013. – Вип. 5. – С. 41–44.
101. Козаченко, Д. М. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіку [Текст] / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Залізничний трансп. України. – 2008. – № 4. – С. 18–20.
102. Козаченко Д. Н. Комплексний аналіз залізничної інфраструктури металургічного комбіната на основі графоаналітичного моделювання [Текст] / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, Н. І. Березовий // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2012. – Вип. 4. – С. 55–60.
103. Козаченко Д. Н. Автоматизированное формирование функциональных моделей железнодорожных станций [Текст] / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2014. – Вип. 8. – С. 65–73.
104. Козаченко, Д. М. Організація передпроектного обстеження залізничних станцій та вузлів [Текст] / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, О. В. Горбова // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2014. – Вип. 7. – С. 27–32.
105. Козаченко, Д. М. Методи збору даних про функціонування залізничних станцій [Текст] / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, О. В. Горбова // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2014. – Вип. 8. – С. 58–64.
106. Статистические методы в инженерных исследованиях [Текст]. – Москва : Высшая шк., 1983. – 128 с.
107. Шторм, Р. Теория вероятностей, математическая статистика, статистический контроль качества [Текст] / Р. Шторм. – Москва : Мир, 1970. – 368 с.

108. Ломотько, Д. В. Формування нечіткої бази знань та системи підтримки прийняття рішення у підрозділах залізниць [Текст] / Д. В. Ломотько // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2006. – № 2 – С. 52–58.
109. Ломотько Д. В. Використання апарату нечіткої логіки для оптимізації розподілу обмеженого ресурсу на залізничному полігоні [Текст] / Д. В. Ломотько // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2006. – № 4 – С. 10–14.
110. Кутах, А. П. Система имитационного моделирования оценки эффективности новых технологий и организации перевозок на железнодорожном транспорте [Текст] / А. П. Кутах, Т. И. Фурсова // Кибернетика и системный анализ. – 2003. – № 6 – С. 156–166.
111. Гончарук, С. М. Автоматизированная система технико-экономического выбора варианта технологического процесса работы станции [Текст] / С. М. Гончарук и др. // Повышение эффективности работы ж.-д. тр-та Сибири и Дальнего Востока : сб. тр. научно-практ. конф. – Хабаровск : ДВГУПС, 1999. – С. 60–61.
112. Warninghoff, C. Nutzung von Simulationen zur Unterstutzung der betrieblichen Infrastrukturplanung / C. Warninghoff, C. Ferchland // ETR: Eisenbahntechn. – 2004. – № 7–8. – S. 490–498.
113. Босов, А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине [Текст] / А. А. Босов, Г. Н. Кирпа. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2004. – 140 с.
114. Левицький, І. Ю. Удосконалення технології прискореної доставки вантажів на залізницях України в умовах ринку транспортних послуг [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / І. Ю. Левицький; ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2004. – 20 с.
115. Бех, П. В. Удосконалення системи контейнерних перевезень на залізницях України [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / П. В. Бех; ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2006. – 20 с.
116. Мозолевич, Г. Я. Підвищення ефективності процесу перевезень за рахунок визначення раціональних параметрів поїздопотоків [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Я. Мозолевич; ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2011. – 24 с.
117. Харченко, О. И. Векторная оптимизация в задаче моделирования технологии доставки груза [Текст] / О. И. Харченко // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2011. – Вип. 1. – С. 99–101.
118. Босов, А. А. Підвищення ефективності роботи транспортної системи на основі структурного аналізу [Текст] / А. А. Босов, Н. А. Мухіна, Б. П. Піх. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2005. – 200 с.
119. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин. – Москва : Физматлит, 2002. – 144 с.
120. Макаров И. Т. Теория выбора и принятия решений [Текст] / И. Т. Макаров. – Москва : Наука, 1982. – 327 с.

121. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы [Текст] / М. Месарович, Я. Такахара. – Москва : Мир, 1978. – 311 с.
122. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций [Текст]. – Москва : ВПИТРАНССТРОЙ, 1988. – 468 с.
123. Єрмошенко, М. М. Аналіз і оцінка інвестиційних проектів [Текст] : навч. посібник / М. М. Єрмошенко. – Київ : Національна академія управління, 2004. – 155 с.
124. Тишкин, Е. М. Закономерности насыщения устройств сортировочных станций вагонами [Текст] / Е. М. Тишкин, В. С. Климанов // Вестн. ВНИИЖТа. – 1980. – № 2 – С. 6-9.
125. Самсонкин, В. Г. Человеческий фактор в обеспечении безопасности железнодорожного транспорта [Текст] / В. Г. Самсонкин // Информ.-управляющие системы на ж.-д. трансп. – 2000. – № 5–6. – С. 65–67.
126. Schmidt, A. Faktor mensch und sicherheit des grenzüberschreitenden schienenverkehrs / A. Schmidt, R. Miller // ETR: Eisenbahntechn. – 2004. – № 12. – S. 832–836.
127. Крылов, В. К. Безопасность движения, охрана труда: новое в обучении [Текст] / В. К. Крылов, Л. М. Годович // Железнодорожный трансп. – 1994. – № 2. – С. 71–72.
128. Авраменко, В. Н. Автоматизированный режимный тренажер на основе ЭВМ для диспетчерского персонала энергосистем [Текст] / В. Н. Авраменко и др. // Электронное моделирование. – 1986. – № 5. – С. 63–66.
129. Самойлов, В. Д. Автоматизация построения тренажеров и обучающих систем [Текст] / В. Д. Самойлов и др. – Киев : Наук. думка, 1989. – 285 с.
130. Макаров, Е. В. Тренажеры для управления воздушным движением [Текст] / Е. В. Макаров // Транспорт, наука, техника, управление. – 1999. – № 6. – С. 35–38.
131. Апенько, Н. В. Стан та перспективи авіаційного тренажеробудування [Текст] / Н. В. Апенько // Вісн. НАУ. – 2012. – № 3. – С. 78–81.
132. Невзоров, Р. В. Використання тренажерів у процесі підготовки курсантів-льотчиків авіаційних вищих військових навчальних закладів [Текст] / Р. В. Невзоров // Зб. наук. пр. Нац. акад. прикордонної служби. Сер.: Педагогічні науки. – 2013. – № 3(68). – С. 197–206.
133. Зайцев, В. Использование тренажеров при подготовке летчиков ВМС США [Текст] / В. Зайцев // Зарубежное военное обозрение. – 2005. – № 2. – С. 59–64.
134. Герганов, Л. Д. Тренажерно-практична підготовка студентів та фахівців плавскладу в морських начальних закладах України як інструмент безпеки судноплавства [Текст] / Л. Д. Герганов // Водний трансп. – 2013. – Вип. 1. – С. 114–118.
135. Недзельский, И. И. Морские навигационные тренажеры: проблема выбора [Текст] / И. И. Недзельский. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – 220 с.

136. Черненко, Н. І. Використання інформаційно-комунікаційних технологій у процесі підвищення кваліфікації фахівців морської галузі [Текст] / Н. І. Черненко // Педагогічний альманах. – 2013. – Вип. 19. – С. 230–235.
137. Баранов, Л. А. Тренажеры для машинистов локомотивов и пути их развития [Текст] / Л. А. Баранов, А. Г. Ройзнер, Б. Л. Зеликман // Транспорт, наука, техника, управление. – 1998. – № 12. – С. 12–15.
138. Делооз, Ф. Применение тренажеров на железнодорожном транспорте [Текст] / Ф. Делооз // Железные дороги мира. – 1999. – № 9. – С. 47–51.
139. Блохин, Е. П. Тренажер для обучения машинистов безопасным и экономичным способам вождения поездов [Текст] / Е. П. Блохин и др. // Залізничний трансп. України. – 1997. – № 2. – С. 25–28.
140. Блохин, Е. П. Тренажерный комплекс для обучения машинистов локомотивов [Текст] / Е. П. Блохин и др. // Информ.-управляющие системы на ж.-д. трансп. – 1999. – № 6. – С. 15–16.
141. Евдомаха, Г. В. О тренажере машиниста локомотива [Текст] / Г. В. Евдомаха // Локомотив-информ. – 2011. – № 7. – С. 54–57.
142. Бернардо дел рио Салседа. Тренажер для профессиональной подготовки работников, управляющих движением поездов [Текст] / Бернардо дел рио Салседа // Совершенствование управления процессами перевозок на ж.-д. трансп. : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : МИИТ, 1983. – Вып. 716. – С. 65–72.
143. Аверьянов, Л. Г. Подготовка операторов сортировочных горок [Текст] / Л. Г. Аверьянов, Г. А. Красовский // Железнодорожный трансп. – 1975. – № 5 – С. 35–37.
144. Training now extends to all staff levels // International railway journal. – 1991. – № 4. – P. 22–23.
145. Тренажеры на железнодорожном транспорте [Текст] // Железные дороги мира. – 1997. – № 4. – С. 31–34.
146. Kolmorgen, V. P. VIDINS – Videodatenbasierte interactive Schienenfahrzeug simulation / V. P. Kolmorgen, A. Naundorf // Eisenbahningenieur. – 2005. – № 6. – S. 40–44.
147. Человеческий фактор на железных дорогах [Текст] // Железные дороги мира. – 1998. – № 5. – С. 32–38.
148. Braband, J. Kompetenzmanagement nach People CMM in der Eisenbahnindustrie / J. Braband // Signal+Draht. – 2006. – № 3. – S. 6–8.
149. Эффективная реконструкция станций с системами МПЦ [Текст] // Железные дороги мира. – 2001. – № 12. – С. 49–54.
150. Finck K. R. Automatisiertes Testen von Bedienplatzsystemen der Eisenbahntechnik / K. R. Finck // Signal+Draht. – 2004. – № 9. – S. 6–16.
151. Машезерский, А. М. Тренажеры для подготовки персонала центров управления движением поездов (Германия) [Текст] / А. М. Машезерский // Железнодорожный трансп.: Экспресс-инф. Сер. 3. ВНИИАС МПС. – 2002. – № 3. – С. 12–15.

152. Система имитации работы устройств централизации и эксплуатационного процесса [Текст] // Железные дороги мира. – 1994. – № 5. – С. 47–49.
153. Меркулов, А. В. Тренажерный обучающий комплекс [Текст] / А. В. Меркулов // Информационные технологии в системах управления на ж.-д. трансп. : сб. тр. Всероссийской научно-практ. конф. ученых трансп. вузов. – Хабаровск : ДВГУПС, 2004. – С. 147–154.
154. Кононов В. А. Компьютерный тренажерный комплекс блочной маршрутно-релейной централизации [Текст] / В. А. Кононов // Автоматика, связь, информатизация. – 2003. – № 4. – С. 28–30.
155. Кулькин, А. Г. Тренировочный комплекс на основе автоматизированного рабочего места поездного диспетчера в системе «ДЦ-ЮГ с РКП» [Текст] / А. Г. Кулькин, Р. А. Иванов // Актуальные проблемы развития технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. тр. РГУПСа. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2002. – С. 36–42.
156. Яцкевич, М. В. Совершенствование подготовки работников железнодорожных станций Новороссийск и Краснодар-Сортировочный с помощью сетевой модели тренажера-имитатора [Текст] / М. В. Яцкевич, А. Т. Шишацкий // Всероссийской научно-техн. конф. «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» : сб. материалов. Пенза : Приволж. дом знаний, 2002. – С. 74–75.
157. Сапунов, Н. А. Компьютерная система обучения и тренажа [Текст] / Н. А. Сапунов, А. И. Кожевников, А. С. Столяров // Железнодорожный трансп. – 1999. – № 2. – С. 14–17.
158. Сапунов, Н. А. Техническая учеба на технической станции [Текст] / Н. А. Сапунов, А. И. Кожевников, С. И. Озеранский // Железнодорожный трансп. – 2000. – № 9. – С. 75.
159. Тимергалин, Х. Н. Возможности автоматизированных обучающих систем и тренажеров [Текст] / Х. Н. Тимергалин // Железнодорожный трансп. – 2004. – № 4. – С. 84–87.
160. Грошев, Г. М. Оценка эффективности применения компьютерных программно-информационных комплексов для профессиональной подготовки персонала железных дорог [Текст] / Г. М. Грошев, А. С. Башилов, Х. Н. Тимергалин // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. тр. ПГУПСа. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2004. – Вып.4. – С. 15–26.
161. Баранов, Л. А. Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена [Текст] / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Железные дороги мира. – 2002. – № 8. – С. 64–69.
162. Баранов, Л. А. Тренажер поездного диспетчера метрополитена [Текст] / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Автоматика, связь, информатизация. – 2003. – № 2. – С. 17–20.
163. Кокурин, И. М. Улучшение условий труда дежурных по станции при МРЦ [Текст] / И. М. Кокурин // Железнодорожный трансп. – 1974. – № 6. – С. 32–35.

164. Кокурин, И. М. Методика количественной оценки деятельности человека-оператора железнодорожных автоматизированных систем управления [Текст] / И. М. Кокурин // Межвуз. сб. науч. тр. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1977. – Вып. 404. – С. 73–83.
165. Верескун, В. Д. Разработка видеосистемы тренажеров для железнодорожного транспорта [Текст] / В. Д. Верескун и др. // Телекоммуникационные технологии на транспорте : I межведомств. научно-практ. конф. – Сочи : МПС РФ, РГУПС, 2004. – С. 439–445.
166. Верескун, В. Д. Учебно-исследовательский комплекс «Виртуальная железная дорога» [Текст] / В. Д. Верескун и др. // Телекоммуникационные технологии на транспорте : I межведомств. научно-практ. конф. – Сочи : МПС РФ, РГУПС, 2004. – С. 366–369.
167. Гаусс, В. П. Использование технологий трехмерного аудио-визуального моделирования для совершенствования маневровой работы на железнодорожном транспорте [Текст] / В. П. Гаусс, Г. Ф. Пахомова, В. И. Хабаров // Сб. материалов научно-практ. конф. «Инфотранс». – Новосибирск : СГУПС, 2002. – С. 148–152.
168. Колесников, В. И. Применение на железнодорожном транспорте тренажеров с использованием практики деловых игр [Текст] / В. И. Колесников // Телекоммуникационные технологии на транспорте : I межведомств. научно-практ. конф. – Сочи : МПС РФ, РГУПС, 2004. – С. 383–387.
169. Шандриков, А. В. Использование тренажеров для обучения операторов систем управления на железнодорожном транспорте [Текст] / А. В. Шандриков, В. И. Мойсеенко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків : УкрДАЗТ, 2005. – Вип. 68 – С. 100–108.
170. Вернигора, Р. В. Современные тренажерные системы для подготовки оперативно-диспетчерского персонала железнодорожных станций [Текст] / Р. В. Вернигора // Вісн. СНУ ім. В. Даля. – 2010. – № 1, ч. 2. – С. 34–40.
171. Мозолевич, Г. Я. Повышение эффективности подготовки студентов за счет использования тренажерных комплексов [Текст] / Г. Я. Мозолевич, Р. В. Вернигора // Міжнар. наук. вісн. : зб. наук. ст. за матеріалами XXV Міжнар. науково-практ. конф., Ужгород – Кошице – Мішкольц, 27-30 листоп. 2012 р. – Ужгород : ЗакДУ, 2013. – Вип. 6(25). – С. 262–270.
172. Вернигора, Р. В. Тренажерный комплекс для подготовки ДСП железнодорожных станций участка на базе локальной вычислительной сети [Текст] / Р. В. Вернигора // Вестн. БелГУТа. – 2010. – № 2 (21). – С. 74–77.
173. Вернигора, Р. В. Підготовка ДСП станцій ділянки з використанням тренажерного комплексу [Текст] / Р. В. Вернигора, В. В. Малашкін // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи і технології перевезень». – 2011. – Вип. 1. – С. 34–37.

174. Большаков, А. А. Использование нечеткой логики для оценки знаний в автоматизированной системе обучения [Текст] / А. А. Большаков и др. // Всероссийской научно-техн. конф. «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» : сб. материалов. – Пенза : Приволж. дом знаний. – 2002. – С. 67–69.
175. Малиновский, Л. Г. Классификация объектов средствами дискриминантного анализа [Текст] / Л. Г. Малиновский. – Москва : Наука, 1979. – 180 с.
176. Энслейн, К. Статические методы для ЭВМ [Текст] / К. Энслейн и др. – Москва : Наука, 1986. – 464 с.
177. Мандель, И. А. Кластерный анализ [Текст] / И. А. Мандель. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 215 с.
178. Бешелев, С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок [Текст] / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – Москва : Статистика, 1974. – 160 с.
179. Андерсон, Т. В. Введение в многомерный статистический анализ [Текст] / Т. В. Андерсон. – Москва : Физматгиз, 1963. – 360 с.

Формализация технического оснащения парка приема

А.1. Формализация путевого развития парка приема

Текст файла данных *plan.dat*, который используется для представления в ЭВМ орграфа модели путевого развития парка приема сортировочной станции, приведен в виде табл. А.1–А.2.

Таблица А.1

Фрагмент текста файла *plan.dat* для формализованного представления в ЭВМ стрелочных переводов и светофоров парка

Центры стрелочных переводов						
v	t	st	e_1	e_2	e_3	e_4
2	2	1	3	0	4	5
4	2	0	7	0	93	8
6	2	0	10	9	11	0
8	1	0	11	0	12	13
10	1	0	16	0	17	18
12	1	0	20	23	22	0
14	1	0	19	0	20	21
16	1	0	17	24	25	0
18	1	0	22	0	28	29
20	1	0	25	0	26	27
22	1	0	33	0	34	35
24	1	0	31	37	36	0
26	1	1	30	0	32	31

Светофоры	
v	q_c
201	0
202	0
203	0
204	1
205	1
206	1
207	1
208	1
209	1
210	1
211	0
212	0
213	0

Окончание табл. А.1

Центры стрелочных переводов						
ν	t	st	e_1	e_2	e_3	e_4
28	1	0	34	39	38	0
30	2	0	50	0	51	52
32	2	0	47	48	49	0
34	2	0	49	0	57	56
36	2	0	53	54	55	0
38	1	0	58	59	60	0
40	1	0	64	65	66	0
42	1	0	66	0	67	68
44	1	0	61	62	63	0
46	1	0	70	71	72	0
48	1	0	63	0	74	76
50	1	0	80	79	81	0
52	1	0	60	0	80	78
54	1	0	74	77	75	0
56	1	0	81	0	82	83
58	1	0	89	0	90	91
60	1	0	85	86	87	0
62	2	0	97	98	96	0
64	2	0	104	105	103	0

Светофоры	
ν	q_c
214	0
215	0
216	0
217	0
218	0
219	1
220	1
221	1
222	0
223	1
224	0
225	0
226	0
227	0
228	0
229	0

**Фрагмент текста файла *plan.dat* для формализованного
представления в ЭВМ путевых участков станции**

Путевые участки													
<i>e</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	N_n	F_e	F_o	<i>e</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	N_n	F_e	F_o
1	201	401	300,0	–	–	–	55	36	423	20,3	–	–	–
2	202	405	300,0	–	–	–	56	34	426	29,1	–	–	–
3	401	2	14,0	–	–	–	57	34	427	19,3	–	–	–
4	2	402	19,3	–	–	–	58	215	38	56,0	–	–	–
5	2	403	19,3	–	–	–	59	217	38	47,0	–	–	–
6	403	203	135,0	–	–	–	60	38	52	0,5	–	–	–
7	405	4	14,0	–	–	–	61	216	44	47,0	–	–	–
8	4	408	29,1	–	–	–	62	411	44	24,0	–	–	–
9	408	6	29,1	–	–	–	63	44	48	0,5	–	–	–
10	203	6	19,3	–	–	–	64	217	40	47,0	–	–	–
11	6	8	41,8	–	–	–	65	218	40	56,0	–	–	–
12	8	205	47,0	–	–	2	66	40	42	43,0	–	–	–
13	8	409	24,0	–	–	–	67	42	221	47,0	–	–	–
14	402	406	115,0	–	–	–	68	42	411	24,0	–	–	–
15	404	211	80,0	–	–	–	69	221	222	50,0	–	–	–
16	406	10	15,2	–	–	–	70	222	46	47,0	–	–	–
17	10	16	48,0	–	–	–	71	414	46	24,0	–	–	–
18	10	407	24,0	–	–	–	72	46	220	15,2	–	–	–
19	211	14	15,2	–	–	–	73	220	416	150,0	–	–	–
20	14	12	48,0	–	–	–	74	48	54	48,0	–	–	–
21	14	407	24,0	–	–	–	75	54	414	24,0	–	–	–
22	12	18	43,0	–	–	–	76	48	415	24,0	–	–	–
23	407	12	24,0	–	–	–	77	415	54	24,0	–	–	–
24	407	16	24,0	–	–	–	78	52	415	24,0	–	–	–

Путевые участки														
<i>e</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	N_{Π}	F_{ϵ}	F_{\circ}		<i>e</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	N_{Π}	F_{ϵ}	F_{\circ}
25	16	20	43,0	–	–	–		79	415	50	24,0	–	–	–
26	20	208	47,0	–	–	2		80	52	50	48,0	–	–	–
27	20	418	24,0	–	–	–		81	50	56	0,5	–	–	–
28	18	209	47,0	–	–	2		82	56	223	47,0	–	–	–
29	18	210	47,0	–	–	2		83	56	420	29,2	–	–	–
30	418	26	24,0	–	–	–		84	223	417	150,0	–	–	–
31	26	24	48,0	–	–	–		85	420	60	29,2	–	–	–
32	26	410	24,0	–	–	–		86	421	60	29,2	–	–	–
33	409	22	24,0	–	–	–		87	60	219	15,2	–	–	–
34	22	28	48,0	–	–	–		88	219	419	150,0	–	–	–
35	22	410	24,0	–	–	–		89	423	58	21,5	–	–	–
36	24	207	15,2	–	–	2		90	58	422	1 000	–	–	–
37	410	24	24,0	–	–	–		91	58	421	29,2	–	–	–
38	28	206	15,2	–	–	–		92	427	428	1 000	–	–	–
39	410	28	24,0	–	–	2		93	4	204	47,0	–	–	2
40	204	212	928,0	II	–	–		94	224	201	1 300	–	3	4
41	205	213	880,0	I	–	–		95	413	224	1 500	–	3	4
42	206	214	860,0	1	–	–		96	62	413	14,0	–	–	–
43	207	215	860,0	2	–	–		97	225	62	63,0	–	1	–
44	208	216	860,0	3	–	–		98	226	62	50,5	–	–	2
45	209	217	860,0	4	–	–		99	432	225	1 000	–		–
46	210	218	860,0	5	–	–		100	431	226	1 000	–	–	–
47	212	32	50,5	–	–	–		101	227	202	1 300	–	3	4
48	425	32	29,1	–	–	–		102	412	227	1 500	–	3	4
49	32	34	40,6	–	–	–		103	64	412	14,0	–	–	–

Путевые участки													
e	v	u	l	N_{Π}	F_{ϵ}	F_o	e	v	u	l	N_{Π}	F_{ϵ}	F_o
50	213	30	14,0	–	–	–	104	228	64	63,0	–	1	
51	30	424	78,8	–	–	–	105	229	64	50,5	–	–	2
52	30	425	29,1	–	–	–	106	430	228	1 000	–	–	–
53	424	36	78,8	–	–	–	107	429	229	1 000	–	–	–
54	426	36	29,1	–	–	–							

А.2. Формализация системы станционной автоматики

Текст файла данных *ec_model.dat*, который используется для представления в ЭВМ модели управления движением транспортных объектов, приведен в табличном виде (табл. А.3–А.5).

Таблица А.3

Фрагмент текст файла *ec_model.dat* для формализованного представления в ЭВМ стрелочных переводов системы ЭЦ станции

Стрелочные переводы									
N_s	Инцидентные вершины				Параметры				
					R_s	Z_s			
	$u_{\text{ч1}}$	$u_{\text{ч2}}$	$u_{\text{н1}}$	$u_{\text{н2}}$		$z_{\text{ч1}}$	$z_{\text{ч2}}$	$z_{\text{н1}}$	$z_{\text{н2}}$
2	402	403	401	0	3	–1	–1	–1	–1
4	204	6	405	0	6	–1	1	–1	–1
6	8	0	203	4	7	–1	–1	1	–1
8	205	22	6	0	7	–1	–1	–1	–1
10	16	12	406	0	9	0	1	–1	–1
12	18	0	14	10	10	–1	–1	0	1
14	12	16	211	0	10	0	1	–1	–1
16	20	0	10	14	9	–1	–1	0	1
18	209	210	12	0	10	–1	–1	–1	–1

Стрелочные переводы									
N_s	Инцидентные вершины				Параметры				
					R_s	Z_s			
	$u_{ч1}$	$u_{ч2}$	$u_{н1}$	$u_{н2}$		$z_{ч1}$	$z_{ч2}$	$z_{н1}$	$z_{н2}$
20	208	26	16	0	9	-1	-1	-1	-1
22	28	24	8	0	11	0	1	1	-1
24	207	0	26	28	12	-1	-1	1	1
26	28	24	20	0	12	1	0	1	-1
28	206	0	22	26	11	-1	-1	0	0
30	36	32	213	0	22	0	1	-1	-1
32	34	0	212	30	20	-1	-1	-1	1
34	427	36	32	0	20	-1	1	-1	-1
36	58	0	30	34	23	-1	-1	0	1
38	52	0	215	214	25	-1	-1	-1	-1
40	42	0	217	218	33	-1	-1	-1	-1
42	221	44	40	0	33	-1	1	-1	-1
44	48	0	216	42	29	-1	-1	-1	1
46	220	0	222	54	30	-1	-1	-1	-1
48	54	50	44	0	29	0	1	-1	-1
50	56	0	52	48	25	-1	-1	0	1
52	50	54	38	0	25	0	1	-1	-1
54	46	0	48	52	29	1	-1	0	1
56	223	60	50	0	25	-1	0	-1	-1
58	422	60	36	0	24	-1	1	-1	-1
60	219	0	56	58	26	-1	-1	1	1
62	413	0	225	226	38	-1	-1	-1	-1
64	412	0	228	229	41	-1	-1	-1	-1

**Фрагмент текст файла *ec_model.dat* для формализованного
представления в ЭВМ светофоров и изолированных стыков
системы ЭЦ станции**

Светофоры и изолированные стыки									
N_c	Инцидентные вершины		Параметры						
	$u_{ч1}$	$u_{н1}$	T_c	d_c	R_c	$R_{ч}$	$R_{н}$	Z_c	
								$z_{ч1}$	$z_{н1}$
201	2	224	2	0	1	1	34	-1	-1
202	4	227	2	0	2	2	36	-1	-1
203	6	2	1	0	5	0	5	0	1
204	212	4	1	1	13	13	0	-1	0
205	213	8	1	1	14	14	0	-1	0
206	214	28	1	1	15	15	0	-1	-1
207	215	24	1	1	16	16	0	-1	-1
208	216	20	1	1	17	17	0	-1	0
209	217	18	1	1	18	18	0	-1	0
210	218	18	1	1	19	19	0	-1	1
211	14	404	1	0	8	0	8	-1	-1
212	32	204	2	0	20	0	13	0	-1
213	30	205	2	0	22	0	14	-1	-1
214	38	206	2	0	25	0	15	1	-1
215	38	207	2	0	25	0	16	0	-1
216	44	208	2	0	29	0	17	0	-1
217	40	209	2	0	33	0	18	0	-1
218	40	210	2	0	33	0	19	1	-1
219	419	60	1	1	27	27	0	-1	-1
220	416	46	1	1	31	31	0	-1	-1
221	22	42	1	1	32	32	0	-1	0

Светофоры и изолированные стыки									
N_c	Инцидентные вершины		Параметры						
	$u_{ч1}$	$u_{н1}$	T_c	d_c	R_c	$R_ч$	$R_н$	Z_c	
								$z_{ч1}$	$z_{н1}$
222	46	221	1	0	32	0	32	0	-1
223	417	56	1	1	28	28	0	-1	0
224	201	62	2	0	34	34	35	-1	-1
225	62	432	2	0	38	0	39	0	-1
226	62	431	2	0	38	0	40	1	-1
227	202	64	2	0	36	36	37	-1	-1
228	64	430	2	0	41	0	42	0	-1
229	64	429	2	0	41	0	43	1	-1
401	2	201	0	-1	0	0	1	-1	-1
402	10	2	0	-1	0	4	0	-1	0
403	203	2	0	-1	0	5	0	-1	1
405	4	202	0	-1	0	0	2	-1	-1
406	10	2	0	-1	0	0	4	-1	0
412	224	62	0	-1	0	35	0	-1	-1
413	227	64	0	-1	0	37	0	-1	-1
427	428	34	0	-1	0	21	0	-1	0

**Фрагмент текст файла *es_model.dat* для формализованного
представления в ЭВМ изолированных секций системы ЭЦ станции**

Изолированные секции										
N_r	T_r	Путевые участки, входящие в секцию								
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–
2	1	2	–	–	–	–	–	–	–	–
3	0	3	4	5						
4	1	14	–	–	–	–	–	–	–	–
5	1	6	–	–	–	–	–	–	–	–
6	0	7	8	93	–	–	–	–	–	–
7	0	9	10	11	12	13	–	–	–	–
8	1	15	–	–	–	–	–	–	–	–
9	0	16	17	18	24	25	26	27	–	–
10	0	19	20	21	22	23	28	29	–	–
11	0	33	34	35	38	39	–	–	–	–
12	0	30	31	32	36	37	–	–	–	–
13	1	40	–	–	–	–	–	–	–	–
14	1	41	–	–	–	–	–	–	–	–
15	1	42	–	–	–	–	–	–	–	–
16	1	43	–	–	–	–	–	–	–	–
17	1	44	–	–	–	–	–	–	–	–
18	1	45	–	–	–	–	–	–	–	–
19	1	46	–	–	–	–	–	–	–	–
20	0	47	48	49	56	57	–	–	–	–
21	1	92	–	–	–	–	–	–	–	–
22	0	50	51	52	–	–	–	–	–	–
23	0	53	54	55	–	–	–	–	–	–

Анализ параметров входящего потока поездов

Б.1. Расписание прибытия поездов в парк приема станции

Для определения параметров входящего потока поездов, поступающих в парк приема A станции H , по графикам исполненного движения за трое суток были установлены категория и момент прибытия каждого поезда (см. табл. Б.1). Эти данные использовались для определения интервалов между прибывающими поездами отдельно для каждого из подходов.

Таблица Б.1

Расписание прибытия поездов

№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда	№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда
1	08–10	Р	Д	36	15–55	Т	Ю
2	08–19	П	Д	37	16–00	Т	Ю
3	08–20	П	Ю	38	16–02	П	Д
4	08–25	Т	Ю	39	16–10	Р	Д
5	08–30	П	Д	40	16–20	Р	Ю
6	08–35	Т	Д	41	16–25	Т	Ю
7	08–45	П	Д	42	16–25	Р	Д
8	09–00	П	Д	43	16–30	П	Д
9	09–13	П	Д	44	16–35	П	Д
10	09–24	Т	Д	45	16–54	П	Ю
11	09–40	Р	Д	46	17–20	Т	Ю
12	09–54	П	Ю	47	17–25	П	Д
13	10–05	П	Д	48	17–34	П	Д

Продолжение табл. Б.1

№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда	№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда
14	10–10	П	Д	49	17–44	Р	Д
15	10–30	Т	Д	50	17–50	П	Д
16	10–40	Р	Ю	51	17–55	Т	Ю
17	10–45	Т	Д	52	18–50	Р	Д
18	10–50	Р	Ю	53	18–58	П	Д
19	11–01	Т	Ю	54	19–10	П	Д
20	11–10	Т	Д	55	19–20	Т	Д
21	11–46	П	Д	56	19–40	Р	Д
22	11–54	Т	Д	57	19–53	Т	Д
23	12–10	Р	Ю	58	20–02	Р	Д
24	12–20	Т	Д	59	20–20	П	Ю
25	12–44	Т	Ю	60	20–40	П	Д
26	12–51	П	Д	61	20–50	П	Д
27	13–05	П	Д	62	21–15	Т	Д
28	13–45	Т	Д	63	21–24	П	Д
29	13–55	П	Д	64	21–30	Т	Ю
30	14–15	П	Д	65	21–40	Т	Ю
31	14–24	Р	Ю	66	21–44	П	Д
32	14–30	Т	Д	67	21–51	П	Д
33	14–44	Р	Д	68	22–05	Т	Ю
34	14–57	П	Д	69	22–10	Р	Д
35	15–05	Т	Д	70	22–15	Т	Д
71	22–24	П	Д	123	10–10	П	Д
72	22–39	Р	Д	124	10–40	Т	Д
73	22–45	Т	Д	125	10–50	Т	Ю
74	23–04	П	Д	126	11–00	Т	Д
75	23–25	Р	Д	127	11–10	Т	Ю

№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда	№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда
76	23–50	Т	Д	128	11–40	Т	Ю
77	00–05	Р	Д	129	11–55	Т	Ю
78	00–09	Т	Ю	130	12–10	Р	Д
79	00–17	П	Ю	131	12–25	Р	Д
80	00–22	Т	Д	132	13–00	П	Д
81	00–36	П	Д	133	13–07	П	Ю
82	00–40	Т	Ю	134	13–10	Т	Д
83	00–45	Р	Д	135	13–27	Р	Д
84	01–45	П	Д	136	13–35	Т	Д
85	02–06	П	Д	137	13–52	Т	Д
86	02–20	Р	Ю	138	14–00	П	Ю
87	02–40	Р	Д	139	14–01	Р	Д
88	02–45	Т	Д	140	14–18	П	Д
89	02–59	П	Д	141	14–30	Т	Д
90	03–06	П	Д	142	14–50	Т	Ю
91	03–14	П	Д	143	15–00	П	Д
92	03–20	Р	Ю	144	15–12	Т	Д
93	03–23	П	Д	145	15–22	Р	Ю
94	03–30	П	Д	146	15–45	Т	Ю
95	03–43	Т	Ю	147	16–07	П	Ю
96	03–50	Р	Д	148	16–08	Р	Д
97	04–04	Т	Д	149	16–15	Т	Д
98	04–56	П	Д	150	16–21	П	Д
99	05–09	Т	Ю	151	16–28	П	Д
100	05–10	Т	Д	152	16–57	П	Ю
101	06–08	П	Д	153	17–14	Т	Д
102	06–10	Р	Ю	154	17–20	Т	Ю

№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда	№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда
103	06–30	Р	Д	155	17–27	Р	Д
104	06–47	П	Д	156	17–31	П	Д
105	06–50	Т	Д	157	17–35	Т	Ю
106	06–57	Т	Д	158	17–36	П	Д
107	07–01	Т	Д	159	17–50	П	Д
108	07–10	Т	Д	160	18–40	Т	Д
109	07–30	П	Д	161	19–01	Р	Д
110	07–36	Т	Ю	162	19–13	П	Ю
111	07–55	П	Ю	163	19–18	П	Д
112	08–01	Р	Д	164	19–25	Т	Д
113	08–15	Т	Д	165	19–45	Т	Д
114	08–30	Т	Ю	166	20–20	Р	Д
115	08–43	П	Д	167	20–25	П	Ю
116	08–54	Т	Д	168	20–40	П	Д
117	09–04	П	Д	169	20–49	П	Д
118	09–15	Т	Д	170	21–19	Т	Ю
119	09–31	Р	Д	171	21–24	П	Д
120	09–45	Т	Д	172	21–44	П	Д
121	09–51	Т	Ю	173	21–52	П	Д
122	10–00	Т	Ю	174	22–04	Т	Д
175	22–15	Р	Д	227	09–30	Р	Д
176	22–24	П	Д	228	09–35	Р	Д
177	22–35	Т	Ю	229	09–50	Т	Д
178	22–54	Т	Д	230	09–55	П	Ю
179	23–04	П	Д	231	09–56	П	Д
180	23–14	Т	Д	232	10–15	Р	Ю
181	23–25	Р	Ю	233	10–30	Р	Ю

№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда	№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда
182	23–44	Р	Д	234	10–35	Т	Д
183	00–05	Р	Д	235	10–55	Т	Д
184	00–14	П	Ю	236	11–16	Т	Ю
185	00–25	Т	Д	237	11–21	Р	Д
186	00–35	П	Д	238	11–32	Т	Д
187	01–01	Р	Д	239	11–46	Т	Ю
188	01–05	Т	Д	240	11–48	П	Д
189	01–15	Т	Д	241	12–00	Т	Д
190	01–30	Р	Ю	242	12–05	Р	Ю
191	01–45	П	Д	243	12–15	Р	Д
192	01–59	Т	Ю	244	12–40	Р	Д
193	02–06	П	Д	245	12–53	П	Д
194	02–38	Т	Ю	246	13–03	П	Д
195	02–40	Т	Д	247	13–15	Р	Ю
196	02–45	Р	Ю	248	13–29	Т	Д
197	03–05	Т	Ю	249	13–41	Т	Д
198	03–08	П	Д	250	14–00	П	Д
199	03–14	П	Д	251	14–05	Р	Д
200	03–25	П	Д	252	14–15	П	Д
201	03–32	П	Д	253	14–28	Т	Ю
202	03–41	П	Д	254	14–35	Т	Д
203	03–50	Р	Д	255	14–58	П	Д
204	04–56	П	Д	256	15–05	Р	Ю
205	05–05	Р	Ю	257	15–12	Т	Ю
206	05–10	Т	Ю	258	16–02	П	Д
207	05–40	П	Д	259	16–19	Р	Ю
208	06–05	П	Д	260	16–25	Т	Д

№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда	№ п/п	$T_{\text{приб}}$	Категория	Откуда
209	06–25	П	Д	261	16–31	П	Д
210	06–40	Т	Д	262	16–37	П	Д
211	06–50	Т	Ю	263	16–48	Т	Д
212	06–58	П	Д	264	16–49	Р	Ю
213	07–01	Р	Д	265	16–56	Р	Д
214	07–04	Р	Ю	266	17–19	Т	Д
215	07–16	П	Ю	267	17–27	П	Д
216	07–30	Р	Ю	268	17–32	П	Д
217	07–32	П	Д	269	17–46	Т	Д
218	07–45	П	Д	270	17–55	П	Д
219	08–20	П	Ю	271	18–23	Т	Ю
220	08–26	П	Д	272	18–59	Р	Ю
221	08–30	П	Д	273	19–04	П	Д
222	08–35	П	Д	274	19–10	П	Д
223	08–48	П	Д	275	19–15	Т	Ю
224	09–00	П	Д	276	19–28	Т	Д
225	09–10	Т	Д	277	19–45	Р	Д
226	09–16	Т	Ю	278	19–58	Т	Д

Б.2. Анализ интервалов прибытия поездов в парк приема станции

Учитывая, что все интервалы прибытия поездов с одного направления ограничены снизу величиной минимального интервала, который определяется действующей системой регулирования движения поездов, для определения закона распределения интервалов их действительные значения I были заменены расчетными $I^* = I - I_{\min}$. Минимальный интервал прибытия поездов из D принято $I_{\min(D)} = 3$ мин. Статистический ряд распределения полученной случайной величины I^* приведен в табл. Б.2.

Расчет параметров входящего потока поездов из D

№ разряда	Границы разряда	\bar{I}_j^* , мин	m_j	p_j^*	p_j	n_j
1	0–7	3,5	70	0,355	0,376	74,10
2	7–14	10,5	52	0,264	0,235	46,23
3	14–21	17,5	29	0,147	0,146	28,84
4	21–28	24,5	22	0,112	0,091	17,99
5	28–35	31,5	7	0,036	0,057	11,22
6	35–42	38,5	4	0,020	0,036	7,00
7	42–49	45,5	4	0,020	0,022	4,37
8	49–56	52,5	3	0,015	0,014	2,72
9	56–63	59,5	4	0,020	0,009	1,70
10	63 и >	66,5	2	0,010	0,014	2,82
Всего			197	1,000	1,000	197,00

Параметры распределения случайной величины $I_{(D)}^*$:

- минимальное значение $I_{\min(D)}^* = 0$ мин;
- максимальное значение $I_{\max(D)}^* = 67$ мин;
- объем выборки $\sum m_{(D)j} = 197$;
- среднее значение интервала $M[I_{(D)}] = 14,84$ мин;
- дисперсия $D[I_{(D)}] = 191,63$ мин²;
- среднее квадратическое отклонение $S[I_{(D)}] = 13,84$ мин;
- коэффициент вариации $v_{(D)} = 0,93$;
- параметр Эрланга $k_{(D)} = 1,15$.

Учитывая, что параметр $k_{(D)}$ близок к 1, была выдвинута гипотеза о том, что случайная величина $I_{(D)}^*$ распределена по закону Эрланга с параметром $k = 1$ (экспоненциальное распределение). Для проверки гипотезы определены соответствующие значения p_j (см. табл. Б.2) и значения критерия Пирсона $\chi_{(D)}^2$: расчетное значение $\chi_{(D)}^2 = 8,13$; табличное значение $\chi_{(7;0,05)}^2 = 14,07$ (при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n = 7$) [106]. Так как

$\chi_{(Д)}^2 < \chi_{(7;0,05)}^2$, гипотеза об экспоненциальном распределении случайной величины $I_{(Д)}^*$ не противоречит опытным данным.

Аналогичным образом выполнен анализ случайной величины интервалов прибытия поездов в парк приема из Ю. Минимальный интервал прибытия поездов из Ю принят $I_{\min(Ю)} = 5$ мин.

Статистический ряд распределения полученной случайной величины $I_{(Ю)}^*$ приведен в табл. Б.3.

Таблица Б.3

Расчет параметров входящего потока поездов из Ю

№ разряда	Границы разряда	\bar{I}_j^* , мин	m_j	p_j^*	p_j	n_j
1	0–15	7,5	24	0,304	0,318	25,11
2	15–30	22,5	17	0,215	0,217	17,13
3	30–45	37,5	11	0,139	0,148	11,68
4	45–60	52,5	5	0,063	0,101	7,97
5	60–75	67,5	9	0,114	0,069	5,44
6	75–90	82,5	6	0,076	0,047	3,71
7	90–105	97,5	4	0,051	0,032	2,53
8	105–120	112,5	2	0,025	0,022	1,73
9	120–135	127,5	0	0,000	0,015	1,18
10	135 и >	142,5	1	0,013	0,032	2,53
Всего			79	1,000	1,000	79,00

Параметры распределения случайной величины $I_{(Ю)}^*$:

- минимальное значение $I_{\min(Ю)}^* = 0$ мин;
- максимальное значение $I_{\max(Ю)}^* = 140$ мин;
- объем выборки $\Sigma m_{(Ю)j} = 79$;
- среднее значение интервала $M[I_{(Ю)}] = 39,21$ мин;
- дисперсия $D[I_{(Ю)}] = 1\,053,73$ мин²;
- среднее квадратическое отклонение $S[I_{(Ю)}] = 32,46$ мин;
- коэффициент вариации $v_{(Ю)} = 0,83$;
- параметр Эрланга $k_{(Ю)} = 1,46$.

Учитывая, что параметр $k_{(Ю)} < 1,5$, была выдвинута гипотеза о том, что случайная величина $I_{(Ю)}^*$ распределена по закону Эрланга с параметром $k_{(Ю)} = 1$ (экспоненциальное распределение) и определены соответствующие значения p_j (см. табл. Б.3) и значения критерия Пирсона $\chi_{(Ю)}^2$: расчетное значение $\chi_{(Ю)}^2 = 7,95$; табличное значение $\chi_{(7;0,05)}^2 = 14,07$ (при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n = 7$). Так как $\chi_{(Ю)}^2 < \chi_{(7;0,05)}^2$, гипотеза об экспоненциальном распределении случайной величины $I_{(Ю)}^*$ не противоречит опытным данным.

Анализ параметров системы обслуживания поездов в парке приема станции

В.1. Результаты хронометража процесса обслуживания поездов в парке приема

Таблица В.1

Данные хронометража процесса обслуживания поездов в парке

№ п/п	№ поезда	$N_{\text{ваг.}}$ ваг.	$T_{\text{закр.}}$ МИН	$T_{\text{то.}}$ МИН	$T_{\text{уб.}}$ МИН	$T_{\text{р.}}$ МИН	$T_{\text{док.}}$ МИН	$T_{\text{кор.}}$ МИН
1	3508	57	5,2	44	4,0	17	37	5
2	2806	48	4,0	29	3,4	16	41	10
3	3702	52	4,1	32	3,6	14	42	8
4	2808	44	3,6	25	3,1	16	41	8
5	2608	39	3,2	20	2,9	13	31	8
6	2804	45	3,8	26	3,3	10	46	6
7	2812	49	4,1	30	3,5	16	42	6
8	5004	42	3,4	22	3,1	12	36	6
9	5902	41	3,3	20	2,9	12	46	7
10	2810	31	2,8	18	2,7	9	42	7
11	3530	38	3,1	19	2,9	10	46	6
12	2614	46	3,9	27	3,3	17	53	5
13	5904	47	3,9	28	3,4	15	38	7
14	2818	53	4,3	33	3,7	18	58	6
15	2822	55	4,9	37	3,9	11	45	6
16	2824	49	4,1	30	3,5	17	44	6

№ п/п	№ поезда	$N_{\text{ваг.}}$ ваг.	$T_{\text{закр.}}$ мин	$T_{\text{то.}}$ мин	$T_{\text{уб.}}$ мин	$T_{\text{р.}}$ мин	$T_{\text{док.}}$ мин	$T_{\text{кор.}}$ мин
17	3722	52	4,1	31	3,6	17	55	11
18	3510	45	3,8	26	3,2	12	36	6
19	2842	44	3,5	23	3,1	13	43	7
20	2852	41	3,4	21	3,0	12	36	6
21	3512	33	3,0	19	2,8	9	48	9
22	2832	47	3,9	29	3,4	16	51	6
23	3532	55	4,5	34	3,8	20	49	8
24	2626	42	3,4	22	3,0	14	43	6
25	2836	44	3,7	26	3,2	13	39	6
26	2902	41	3,3	20	2,9	15	45	7
27	2612	44	3,5	24	3,1	13	37	5
28	3514	46	3,9	27	3,3	12	52	7
29	1406	43	3,4	23	3,1	12	51	8
30	3506	45	3,9	26	3,3	14	39	5

В.2. Определение параметров системы обслуживания поездов

Расчеты параметров распределения случайных величин продолжительности выполнения технологических операций с документами на прибывающие в парк приема поезда приведены в табл. В.2–В.3.

Таблица В.2

Расчет параметров распределения случайной величины продолжительности обработки документов $T_{\text{док}}$

Интервал x , мин	m	p	np	Параметры
30,0–35,0	1	0,058	1,75	$x_{\text{min}} = 31,00$ мин
35,0–40,0	8	0,217	6,51	$x_{\text{max}} = 58,00$ мин
40,0–45,0	10	0,328	9,83	$\bar{x} = 43,833$ мин

Окончание табл. В.2

Интервал x , мин	m	p	np	Параметры
45,0–50,0	5	0,245	7,36	$\sigma_x = 6,046$ мин $\chi^2 = 2,37$
50,0–55,0	5	0,110	3,29	
55,0–60,0	1	0,042	1,27	

Гипотеза: распределение – логарифмически нормальное. Критическое значение критерия Пирсона $\chi_x^2 = 7,80$, так как $2,37 < 7,80$, то гипотеза может быть принята.

Таблица В.3

Расчет параметров распределения случайной величины продолжительности корректировки документов $T_{\text{кор}}$

Интервал x , мин	m	p	np	Параметры
4,0–5,0	4	0,178	5,33	$x_{\min} = 5,00$ мин $x_{\max} = 11,00$ мин $\bar{x} = 6,30$ мин $\sigma_x = 1,424$ мин $\chi^2 = 3,82$
5,0–6,0	12	0,280	8,39	
6,0–7,0	6	0,263	7,89	
7,0–8,0	5	0,161	4,83	
8,0–9,0	1	0,075	2,25	
9,0–10,0	1	0,029	0,87	
10,0–11,0	1	0,014	0,43	

Гипотеза: распределение – логарифмически нормальное. Критическое значение критерия Пирсона $\chi_x^2 = 9,50$, так как $3,82 < 9,50$, то гипотеза может быть принята.

Формирование множества эффективных вариантов при совершенствовании работы парка приема

Г.1. Формирование базового множества эффективных вариантов

Для формирования базового множества $\tilde{\Gamma}^*$ ($\tilde{\Gamma}^* \in \Gamma^*$), которое включает эффективные варианты ОТМ $\gamma^*(\mu)$ (см. п. 5.3), были определены значения множителей Лагранжа μ_j для каждого из рассматриваемых мероприятий Θ_j . Полученные значения μ_j упорядочиваются по возрастанию, после чего формируются множества $\gamma(\mu)$ путем последовательного прибавления элементов Θ_j . Учитывая несовместимость мероприятий Θ_{41} , Θ_{42} , Θ_{43} , Θ_{44} и Θ_{45} (каждое из них представляет собой вариант организации работы бригад ПТО), при формировании множеств вариантов $\gamma(\mu)$ были рассмотрены комбинации ОТМ Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 , с каждым из указанных несовместимых мероприятий. Для каждого множества $\gamma(\mu)$ с учетом выражений (5.2)–(5.3) также были определены оценки $\Delta L[\gamma(\mu)]$ и $\Delta N[\gamma(\mu)]$, которые характеризуют эффективность реализации варианта ОТМ, соответствующего множеству $\gamma(\mu)$. Порядок формирования множеств $\gamma(\mu)$ приведен в табл. Г.1–Г.5.

Полученные множества $\gamma(\mu)$ (варианты ОТМ) сведены в табл. Г.6 и упорядочены по возрастанию оценки $\Delta L[\gamma(\mu)]$. Среди указанных вариантов с учетом условия (5.6) были отобраны несравнимые по Парето варианты $\gamma^*(\mu)$, которые и составляют множество $\tilde{\Gamma}^*$. Указанные варианты выделены в табл. Г.6.

Таблица Г.1

Формирование множества $\gamma(\mu)$ при $\Theta_4 = \Theta_{41}$

μ	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
$0 \leq \mu < 0,982$	\emptyset	0	0
$0,982 \leq \mu < 1,699$	Θ_{41}	439,0	446,9
$1,699 \leq \mu < 1,907$	Θ_3, Θ_{41}	974,4	762,1
$1,907 \leq \mu < 5,107$	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{41}$	1 184,2	872,1
$5,107 \leq \mu$	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{41}$	1 465,1	927,1

Таблица Г.2

Формирование множества $\gamma(\mu)$ при $\Theta_4 = \Theta_{42}$

μ	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
$0 \leq \mu < 0,908$	\emptyset	0	0
$0,908 \leq \mu < 1,699$	Θ_{42}	618,0	680,6
$1,699 \leq \mu < 1,907$	Θ_3, Θ_{42}	1 153,4	995,8
$1,907 \leq \mu < 5,107$	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{42}$	1 363,2	1 105,8
$5,107 \leq \mu$	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{42}$	1 644,1	1 160,8

Таблица Г.3

Формирование множества $\gamma(\mu)$ при $\Theta_4 = \Theta_{43}$

μ	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
$0 \leq \mu < 0,730$	\emptyset	0	0
$0,730 \leq \mu < 1,699$	Θ_{43}	591,4	810,4
$1,699 \leq \mu < 1,907$	Θ_3, Θ_{43}	1 126,8	1 125,6
$1,907 \leq \mu < 5,107$	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 336,6	1 235,6
$5,107 \leq \mu$	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 617,5	1 290,6

Таблица Г.4

Формирование множества $\gamma(\mu)$ при $\Theta_4 = \Theta_{44}$

μ	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
$0 \leq \mu < 0,823$	\emptyset	0	0
$0,823 \leq \mu < 1,699$	Θ_{44}	748,7	910,2
$1,699 \leq \mu < 1,907$	Θ_3, Θ_{44}	1 284,1	1 225,4
$1,907 \leq \mu < 5,107$	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 493,9	1 335,4
$5,107 \leq \mu$	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 774,8	1 390,4

Таблица Г.5

Формирование множества $\gamma(\mu)$ при $\Theta_4 = \Theta_{45}$

μ	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
$0 \leq \mu < 0,849$	\emptyset	0	0
$0,849 \leq \mu < 1,699$	Θ_{45}	853,5	1005,2
$1,699 \leq \mu < 1,907$	Θ_3, Θ_{45}	1 388,9	1 320,4
$1,907 \leq \mu < 5,107$	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 598,7	1 430,4
$5,107 \leq \mu$	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 879,6	1 485,4

Таблица Г.6

Множество вариантов $\gamma(\mu)$

№ п/п	№ варианта	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. грн	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
1	2	Θ_{41}	439,0	446,9
2	4	Θ_{43}	591,4	810,4
3	3	Θ_{42}	618,0	680,6
4	6	Θ_{45}	748,7	910,2
5	5	Θ_{44}	853,5	1 005,5
6	8	Θ_3, Θ_{41}	974,4	762,1

№ п/п	№ варианта	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. грн	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
7	10	Θ_3, Θ_{43}	1 126,8	1 125,6
8	9	Θ_3, Θ_{42}	1 153,4	995,8
9	20	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{41}$	1 184,2	872,1
10	11	Θ_3, Θ_{44}	1 284,1	1 225,4
11	9	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 336,6	1 235,6
12	21	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{42}$	1 363,2	1 105,8
13	12	Θ_3, Θ_{45}	1 388,9	1 320,7
14	44	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{41}$	1 465,1	927,1
15	23	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 493,9	1 335,4
16	24	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 598,7	1 430,7
17	46	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 617,5	1 290,6
18	45	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{42}$	1 644,1	1 160,8
19	47	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 774,8	1 390,4
20	48	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 879,6	1 485,7

Г.2. Формирование дополнительного множества эффективных вариантов

При построении дополнительного множества $\bar{\Gamma}^*$ ($\bar{\Gamma}^* \in \Gamma^*$) вначале формируется исходное множество γ_0 , которое содержит все возможные элементы Θ_j . Каждое последующее множество γ_i формируется на базе предыдущего γ_{i-1} путем исключения из него одного элементов Θ_j . При этом исключается тот элемент, для которого выполняется условие (5.11) на текущем этапе решения задачи. После исключения очередного элемента выполняется соотношения (5.11) для оставшихся элементов. Учитывая несовместимость мероприятий Θ_{41} , Θ_{42} , Θ_{43} , Θ_{44} и Θ_{45} , при формировании множеств вариантов γ_i были рассмотрены комбинации ОТМ Θ_1 , Θ_2 и Θ_3 , с каждым из указанных несовместимых мероприятий. Порядок формирования множеств γ_i приведен в табл. Г.7–Г.11.

Таблица Г.7

Формирование множества γ_i при $\Theta_4 = \Theta_{41}$

Мероприятие Θ_j	$\Delta\Pi(\Theta_j)$	$\Delta N(\Theta_j)$	$\Delta\Pi(\gamma) - \Delta\Pi(\Theta_j)$	$\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)$	μ
Вариант γ_0					
Θ_1	209,8	110,0	1 255,3	817,1	1,536
Θ_2	280,9	55,0	1 184,2	872,1	1,358
Θ_3	535,4	315,2	929,7	611,9	1,519
Θ_{41}	439,0	446,9	1 026,1	480,2	2,137
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 1\,465,1$	$\Delta N(\gamma) = 927,1$	–	–	–
Вариант γ_2					
$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{41}$					
Θ_1	209,8	110,0	974,4	762,1	1,279
Θ_3	535,4	315,2	648,8	556,9	1,165
Θ_{41}	439,0	446,9	745,2	425,2	1,753
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 1\,184,2$	$\Delta N(\gamma) = 872,1$	–	–	–
Вариант γ_3					
Θ_1, Θ_{41}					
Θ_1	209,8	110,0	439,0	446,9	0,982
Θ_{41}	439,0	446,9	209,8	110,0	1,907
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 648,8$	$\Delta N(\gamma) = 556,9$			
Вариант γ_4					
Θ_{41}					
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 439,0$	$\Delta N(\gamma) = 446,9$	–	–	–

Формирование множества γ_i при $\Theta_4 = \Theta_{42}$

Мероприятие Θ_j	$\Delta П(\Theta_j)$	$\Delta N(\Theta_j)$	$\Delta П(\gamma) - \Delta П(\Theta_j)$	$\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)$	μ
Вариант γ_0					
Θ_1	209,8	110,0	1 434,3	1 050,8	1,365
Θ_2	280,9	55,0	1 363,2	1 105,8	1,233
Θ_3	535,4	315,2	1 108,7	845,6	1,311
Θ_{42}	618,0	680,6	1 026,1	480,2	2,137
Итого	$\Delta П(\gamma) = 1 644,1$	$\Delta N(\gamma) = 1 160,8$	—	—	—
Вариант γ_2					
$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{42}$					
Θ_1	209,8	110,0	1 153,4	995,8	1,158
Θ_3	535,4	315,2	827,8	790,6	1,047
Θ_{42}	618,0	680,6	745,2	425,2	1,753
Итого	$\Delta П(\gamma) = 1 363,2$	$\Delta N(\gamma) = 1 105,8$	—	—	—
Вариант γ_3					
Θ_1, Θ_{42}					
Θ_1	209,8	110,0	618,0	680,6	0,908
Θ_{42}	618,0	680,6	209,8	110,0	1,907
Итого	$\Delta П(\gamma) = 827,8$	$\Delta N(\gamma) = 790,6$	—	—	—
Вариант γ_4					
Θ_{42}					
Итого	$\Delta П(\gamma) = 618,0$	$\Delta N(\gamma) = 680,6$	—	—	—

Таблица Г.9

Формирование множества γ_i при $\Theta_4 = \Theta_{43}$

Мероприятие Θ_j	$\Delta\Pi(\Theta_j)$	$\Delta N(\Theta_j)$	$\Delta\Pi(\gamma) - \Delta\Pi(\Theta_j)$	$\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)$	μ
Вариант γ_0					
Θ_1	209,8	110,0	1 407,7	1 180,6	1,192
Θ_2	280,9	55,0	1 336,6	1 235,6	1,082
Θ_3	535,4	315,2	1 082,1	975,4	1,109
Θ_{43}	591,4	810,4	1 026,1	480,2	2,137
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 1 617,5$	$\Delta N(\gamma) = 1 290,6$	—	—	—
Вариант γ_2					
$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$					
Θ_1	209,8	110,0	1 126,8	1 125,6	1,001
Θ_3	535,4	315,2	801,2	920,4	0,870
Θ_{43}	591,4	810,4	745,2	425,2	1,753
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 1 336,6$	$\Delta N(\gamma) = 1 235,6$	—	—	—
Вариант γ_3					
Θ_1, Θ_{43}					
Θ_1	209,8	110,0	591,4	810,4	0,730
Θ_{43}	591,4	810,4	209,8	110,0	1,907
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 801,2$	$\Delta N(\gamma) = 920,4$	—	—	—
Вариант γ_4					
Θ_{43}					
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 591,4$	$\Delta N(\gamma) = 810,4$	—	—	—

Формирование множества γ_i при $\Theta_4 = \Theta_{44}$

Мероприятие Θ_j	$\Delta\Pi(\Theta_j)$	$\Delta N(\Theta_j)$	$\Delta\Pi(\gamma) - \Delta\Pi(\Theta_j)$	$\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)$	μ
Вариант γ_0					
Θ_1	209,8	110,0	1 565,0	1 280,4	1,222
Θ_2	280,9	55,0	1 493,9	1 335,4	1,119
Θ_3	535,4	315,2	1 239,4	1 075,2	1,153
Θ_{44}	748,7	910,2	1 026,1	480,2	2,137
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 1 774,8$	$\Delta N(\gamma) = 1 390,4$	–	–	–
Вариант γ_2					
$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{44}$					
Θ_1	209,8	110,0	1 284,1	1 225,4	1,048
Θ_3	535,4	315,2	958,5	1 020,2	0,940
Θ_{44}	748,7	910,2	745,2	425,2	1,753
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 1 493,9$	$\Delta N(\gamma) = 1 335,4$	–	–	–
Вариант γ_3					
Θ_1, Θ_{44}					
Θ_1	209,8	110,0	748,7	910,2	0,823
Θ_{44}	748,7	910,2	209,8	110,0	1,907
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 958,5$	$\Delta N(\gamma) = 1 020,2$	–	–	–
Вариант γ_4					
Θ_{44}					
Итого	$\Delta\Pi(\gamma) = 748,7$	$\Delta N(\gamma) = 910,2$	–	–	–

Таблица Г.11

Формирование множества γ_i при $\Theta_4 = \Theta_{45}$

Мероприятие Θ_j	$\Delta П(\Theta_j)$	$\Delta N(\Theta_j)$	$\Delta П(\gamma) - \Delta П(\Theta_j)$	$\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)$	μ
Вариант γ_0					
Θ_1	209,8	110,0	1 669,8	1 375,7	1,214
Θ_2	280,9	55,0	1 598,7	1 430,7	1,117
Θ_3	535,4	315,2	1 344,2	1 170,5	1,148
Θ_{45}	853,5	1 005,5	1 026,1	480,2	2,137
Итого	$\Delta П(\gamma) = 1 879,6$	$\Delta N(\gamma) = 1 485,4$	–	–	–
Вариант γ_2					
$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$					
Θ_1	209,8	110,0	1 388,9	1 320,7	1,052
Θ_3	535,4	315,2	1 063,3	1 115,5	0,953
Θ_{45}	853,5	1 005,5	745,2	425,2	1,753
Итого	$\Delta П(\gamma) = 1 598,7$	$\Delta N(\gamma) = 1 430,4$	–	–	–
Вариант γ_3					
Θ_1, Θ_{45}					
Θ_1	209,8	110,0	853,5	1 005,5	0,849
Θ_{45}	853,5	1 005,5	209,8	110,0	1,907
Итого	$\Delta П(\gamma) = 1 063,3$	$\Delta N(\gamma) = 1 115,2$	–	–	–
Вариант γ_4					
Θ_{45}					
Итого	$\Delta П(\gamma) = 853,5$	$\Delta N(\gamma) = 1 005,2$	–	–	–

Полученные множества γ_i (варианты ОТМ) сведены в табл. Г.12 и упорядочены по возрастанию оценки $\Delta\Pi[\gamma_i]$. Среди указанных вариантов с учетом условия (5.6) были отобраны несравнимые по Парето варианты γ^* , которые и составляют множество $\bar{\Gamma}^*$. Указанные варианты выделены в табл. Г.12.

Таблица Г.12

Множество вариантов γ_i

№ п/п	№ варианта	$\gamma(\mu)$	$\Delta\Pi[\gamma(\mu)]$, тыс. у. е.	$\Delta N[\gamma(\mu)]$, ваг.
1	2	Θ_{41}	439,0	446,9
2	4	Θ_{43}	591,4	810,4
3	3	Θ_{42}	618,0	680,6
4	14	Θ_1, Θ_{41}	648,8	556,9
5	5	Θ_{44}	748,7	910,2
6	16	Θ_1, Θ_{43}	801,2	920,4
7	15	Θ_1, Θ_{42}	827,8	790,6
8	6	Θ_{45}	853,5	1 005,2
9	17	Θ_1, Θ_{44}	958,5	1 020,2
10	18	Θ_1, Θ_{45}	1 063,3	1 115,2
11	38	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{41}$	1 184,2	872,1
12	40	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 336,6	1 235,6
13	39	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{42}$	1 363,2	1 105,8
14	44	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{41}$	1 465,1	927,1
15	41	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 493,9	1 335,4
16	42	$\Theta_1, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 598,7	1 430,4
17	46	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{43}$	1 617,5	1 290,6
18	45	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{42}$	1 644,1	1 160,8
19	47	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{44}$	1 774,8	1 390,4
20	48	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_{45}$	1 879,6	1 485,4

Для нотаток

Наукове видання

**Бобровський Володимир Ілліч,
Козаченко Дмитро Миколайович,
Вернигора Роман Віталійович,
Малашкін Вячеслав Віталійович**

Функціональне моделювання роботи залізничних станцій

Монографія
(російською мовою)

Редактор *О. О. Котова*
Комп'ютерна верстка *О. М. Гончаренко*

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 15,81. Обл.-вид. арк. 15,87.
Тираж 300 пр. Зам. №

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010