

На правах рукописи



Колокольников Виталий Сергеевич

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИГОНОВ
НА СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Специальность 05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Екатеринбург
2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО УрГУПС)

Научный консультант – доктор технических наук, профессор,
лауреат Государственной премии РФ,
Козлов Петр Алексеевич.

Официальные оппоненты:

Горелик Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», кафедра «Системы управления транспортной инфраструктурой», заведующий кафедрой;

Осьминин Александр Трофимович, доктор технических наук, профессор, акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», объединенный ученый совет ОАО «РЖД», заместитель председателя Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» по научному развитию и взаимодействию;

Рахмангулов Александр Нельевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра «Логистика и управление транспортными системами», профессор.

Ведущая организация – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»).

Защита состоится «26» «ноября» 2021 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 при Уральском государственном университете путей сообщения по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, аудитория Б2-15.

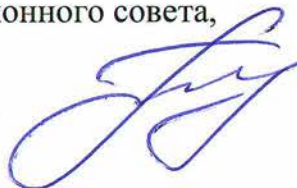
С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного университета путей сообщения, на официальном web-портале УрГУПС www.usurt.ru.

Автореферат разослан «___» «_____» 2021 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять в адрес Диссертационного совета по почте.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ускорение темпов развития экономики всегда было и остается важнейшей задачей для нашей страны. Экономическое развитие, особенно для гигантской России, не возможно без развитого транспорта, ведь его основная задача – обеспечить экономические связи надежными и эффективными транспортными связями. И транспортная инфраструктура должна соответствовать этой задаче.

В проекте Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2035 года предусматривается «ускоренное развитие отраслей экономики и сфер жизнедеятельности за счет опережающего развития транспортной инфраструктуры и видов транспорта». Такие технологии потенциально есть. В области пассажирских перевозок – высокоскоростное и скоростное движение (в том числе и на существующей инфраструктуре). В области грузовых – транзит с Востока на Запад, согласованный подвод грузов к портам и к крупным предприятиям для резкого снижения стыковых потерь и др. Для решения этих задач железнодорожная инфраструктура должна быть достаточно развита. Но густота железнодорожной сети в России почти в пять раз меньше, чем в США, средняя скорость продвижения грузопотока в несколько раз ниже, чем в экономически развитых странах. Необходимо существенное инфраструктурное развитие.

Однако развитие сети потребует огромных инвестиций. И здесь большое значение имеет разработка корректных методов расчета параметров инфраструктурных проектов. Многолетний опыт показывает, что при расчете проектируемых железнодорожных станций наиболее эффективным методом является имитационное моделирование. Есть все основания полагать, что для расчета полигонов имитационное моделирование также станет основным методом оценки проектов. Уже и в Транспортной стратегии об этом говорится: «необходимо «проведение имитационной экспертизы инвестиционных проектов развития транспортной инфраструктуры, создание имитационных систем, комплексное исследование на моделях функционирования проектируемых транспортных объектов с выдачей их реальной пропускной способности, «узких мест» и показателей работы». Поэтому необходимо разработать методологию и технологию имитационного моделирования больших полигонов и на этой основе предложить способы их оптимизации.

Целью исследования является создание методологии расчета и структурно-функциональной оптимизации больших полигонов железнодорожного транспорта с использованием имитационного моделирования.

Задачи исследования состоят в следующем:

– анализ существующих теоретических подходов и технологии расчета полигонов железнодорожного транспорта с точки зрения их корректности;

- разработка структурно-технологического подхода как основы для отображения структурных элементов в модели полигона;
- разработка методологии макро моделирования станций, в том числе парков и горловин;
- разработка методологии макро моделирования участков для построения имитационной модели полигона;
- создание технологии моделирования больших полигонов, их исследования и расчета;
- разработка стратегии оптимизации полигонов на основе имитационного моделирования.

В качестве **объекта исследования** выбраны полигоны железнодорожного транспорта. **Предметом исследования** является проблема их расчета и оптимизации.

Научная новизна исследования. В диссертации разработана методология исследования, расчета и оптимизации больших полигонов железнодорожного транспорта с использованием имитационного моделирования. В том числе разработаны:

- теоретические принципы более корректного представления железнодорожных станций и участков в моделях их расчета. Показано, что основным расчетным элементом железнодорожных объектов не может являться «канал обслуживания» (существующие методики), а только канал вместе со связанным с ним бункером (дуплекс). Величина бункера определяет уровень возможного использования канала. Показано, что станции и участки являются совокупными дуплексами. Это принципиально меняет природу методов расчета;
- принципы эффективного структурно-функционального взаимодействия элементов железнодорожных станций. Расчетный полигон следует представлять не как последовательность каналов (существующий подход), а как цепочку дуплексов с вытекающими отсюда последствиями. Показано, что совокупными дуплексами являются не только станции, но и участки;
- методология двухэтапного расчета и оптимизации больших полигонов на основе имитационного моделирования. На первом этапе на макро модели полигона определяются основные его параметры и проблемные станции, на втором – на подробных моделях детально исследуются и оптимизируются проекты развития станций;
- разработаны основные стратегии структурно-функциональной оптимизации полигонов: по критериям «максимальная пропускная способность», «максимальная скорость пропуска потока», «минимальные затраты».

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке принципов эффективного структурно-функционального взаимодействия в

сложных потоковых системах и методологии оптимизации сложных систем с использованием имитационного моделирования.

Практическая значимость. Разработанные научные основы и методические материалы могут быть использованы на железнодорожном транспорте при планировании развития инфраструктуры для более корректной оценки параметров проектируемых станций и участков. Разработанные стратегии оптимизации позволят более эффективно использовать инвестиции при развитии полигонов в различных условиях. Предложенные новые принципы отображения станций и участков в моделях расчета могут стать основой для совершенствования существующих инструкций определения пропускной способности элементов железнодорожной сети.

Методология и методы исследования базируются на использовании аппарата оптимизации, теории случайных процессов, теории множеств, теории моделирования и теории принятия решений. **Методической основой** явились труды ведущих учёных отрасли в области расчёта транспортных систем, технологии работы транспорта, методов моделирования и оптимизации: В.М.Акулиничева, А.Э.Александрова, В.И.Апатцева, А.П.Батурина, А.Ф.Бородина, Н.П.Бусленко, И.П.Владимирской, А.В.Горелика, С.М. Резера, Ю.В.Дьякова, Ю.И.Ефименко, П.А.Козлова, В.А.Кудрявцева, А.В.Кутыркина, Б.А.Лёвина, В.Я.Негрея, В.И.Некрашевича, А.Т.Осьминина, Ю.О.Пазойского, В.А.Персианова, А.П.Петрова, Н.В.Правдина, А.Н. Рахмангулова, С.М.Резера, И.Г.Слободянюк, Е.А.Сотникова, И.Б.Сотникова, Е.Н.Тимухиной, Е.М.Тишкина, Н.А.Тушина, А.К.Угрюмова, Н.С.Ускова, Д.Р.Фалкерсона, Л.Р.Форда, Н.Н.Шабалина, В.А.Шарова, М.И.Шмулевича, а также разработки ведущих научных организаций отрасли.

Результаты исследования, выносимые на защиту:

- структурно-функциональный подход при отображении структурных элементов в моделях их расчета;
- новый минимальный расчетный элемент «дуплекс» вместо обычно применяемого «канал обслуживания»;
- технология макро моделирования станций и участков;
- технология построения на имитационных моделях больших полигонов железнодорожного транспорта;
- методология исследования, расчета и оптимизации больших полигонов с использованием имитационного моделирования.

Достоверность и обоснованность основных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается совпадением результатов расчетов на имитационных моделях с фактическими показателями работы полигона, логичным построением процесса исследования, корректным использованием математиче-

ских методов и оптимизирующих процедур, а также экспериментальными расчётами и внедрением результатов исследования в практику.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований использованы при создании имитационной системы моделирования полигонов ИМЕТРА, которая получила государственную регистрацию. С участием автора разработана и утверждена в ОАО «РЖД» технология моделирования станций и полигонов – «Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением «узких мест», влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования». Построенная автором модель главного полигона Свердловской ж.д. (88 станций) использовалась при проектировании его развития для увеличения размеров тяжеловесного движения на период до 2025 г. Рассчитанное этапное развитие полигона позволит сэкономить 1 млрд. 800 млн. рублей по сравнению с аналогичным расчетом по существующим инструкциям. Имитационная система ИМЕТРА, разработанная по описанным в диссертации принципам, используется в Институте экономики и развития транспорта (ИЭРТ) для оценки эффективности проектов развития железнодорожных узлов и полигонов.

Технология моделирования полигонов используются в учебном процессе Уральского государственного университета путей сообщения при изучении дисциплин «Моделирование транспортных систем», «Оптимизация транспортных систем», «Теория принятия решений», «Управление эксплуатационной работой».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались и были одобрены на конференциях:

– пятая научно-техническая конференция с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование», Москва: ОАО «НИИАС», 2016;

– вторая международная научно-практическая конференция «Транспорт и логистика: инновационное развитие в условиях глобализации технологических и экономических связей», Ростов-на-Дону, 07–08.02.2018;

– международная научно-практическая конференция «Высокоскоростные железные дороги – драйвер экономического роста», МИИТ, 30–31.05.2018;

– международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование», МИИТ, 29.11–02.12.2018;

– международная научно-техническая конференция РУТ (МИИТ) «Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом», Москва, 20–21.11.2019.

В целом работа одобрена на расширенном заседании кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения 17 ноября 2020 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 42 работы, в том числе 27 – в ведущих изданиях из перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России, 2 – в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объём диссертации. Работа содержит 299 страниц машинописного текста, включая рисунки и таблицы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка использованной литературы из 181 наименования и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности проблемы и степень ее разработанности, формулируется цель и задачи исследования, характеризуется научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приводятся методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

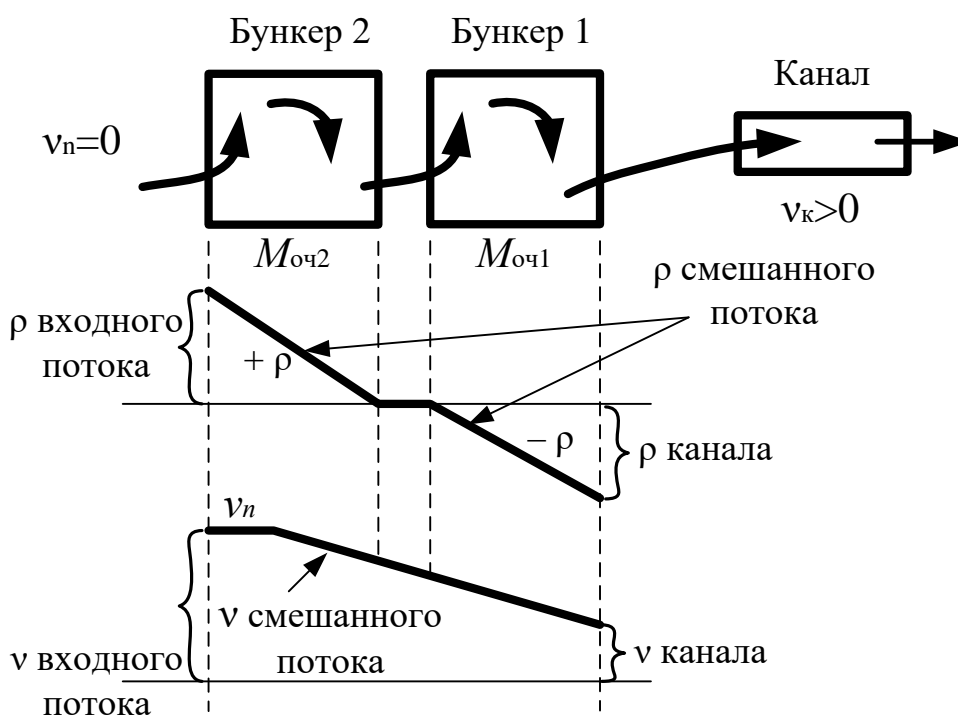
В главе 1 «Проблемы развития сети железных дорог и методы расчета инфраструктурных проектов» показано несоответствие уровня развития железнодорожной инфраструктуры требованиям современной рыночной экономики, а также недостатки существующих методов расчета железнодорожных станций и полигонов.

Густота железнодорожной сети и скорость продвижения поездопотоков в несколько раз отстают от аналогичных показателей в развитых странах. По данным ИЭРТ предполагается интенсивное развитие железнодорожной инфраструктуры. На это планируются огромные инвестиции. Большую важность приобретает корректность методов расчета станций и полигонов. В главе дается сравнительный анализ существующих методов и подходов. Делается вывод, что наиболее обоснованным и эффективным является имитационное моделирование. Это доказывается многолетним опытом его применения при расчете железнодорожных станций и транспортных узлов. О необходимости его широкого применения говорится и в Транспортной стратегии. Необходимо активно применять имитационное моделирование и при расчете полигонов.

Глава 2 «Теоретические основы расчета и оптимизации» посвящена разработке новых, более корректных принципов отображения станций и участ-

ков в моделях, что существенно меняет характер методов расчета, а также методологических основ оптимизации больших полигонов.

В главе подробно рассмотрены принципиальные подходы, принятые в существующих инструкциях по определению пропускной способности объектов железнодорожного транспорта, выявлен ряд некорректностей, предложены и обоснованы новые принципы. Принятие в качестве основного расчетного элемента канала обслуживания не соответствует действительности. Как правило, перед каналом находится связанный с ним бункер (резервные пути), который преобразует случайный поток в управляемый и, тем самым, повышает возможный уровень полезного использования канала (рисунок 1).



ρ – уровень дезорганизации, v – коэффициенты вариации, $M_{оч}$ – величина очереди

Рисунок 1. Взаимодействие потока и структуры в канало-бункере

На имитационной модели комплекса «парк – горка» выполнены расчеты в двух вариантах – с учетом технического обслуживания составов (есть и структурный, и функциональный каналы) и без него (имеется только структурный канал) (рисунок 2).

В структурном канале обслуживающим элементом является элемент путевого развития (горка, горловина, грузовой фронт), в функциональном – бригады, локомотивы и др. Снижение загрузки каналов существенно, и при дальнейшем добавлении функциональных каналов (уборка поездного локомотива, заезд горочного локомотива и т.д.) эта тенденция продолжится. Как видно из графика, при отсутствии резервных путей горка может быть загружена только

на 20–22 %. То есть, коэффициент возможного использования канала γ изменяется с увеличением управляемой части потока от 0,2 до 1. А чтобы использовать горку на 95 %, требуется 18 только резервных путей. Если добавить один обгонный и два на обработку – получится 21 путь. Такие парки не строятся, поэтому 95%-й загрузки горки достичь нельзя.

загрузка канала,
%

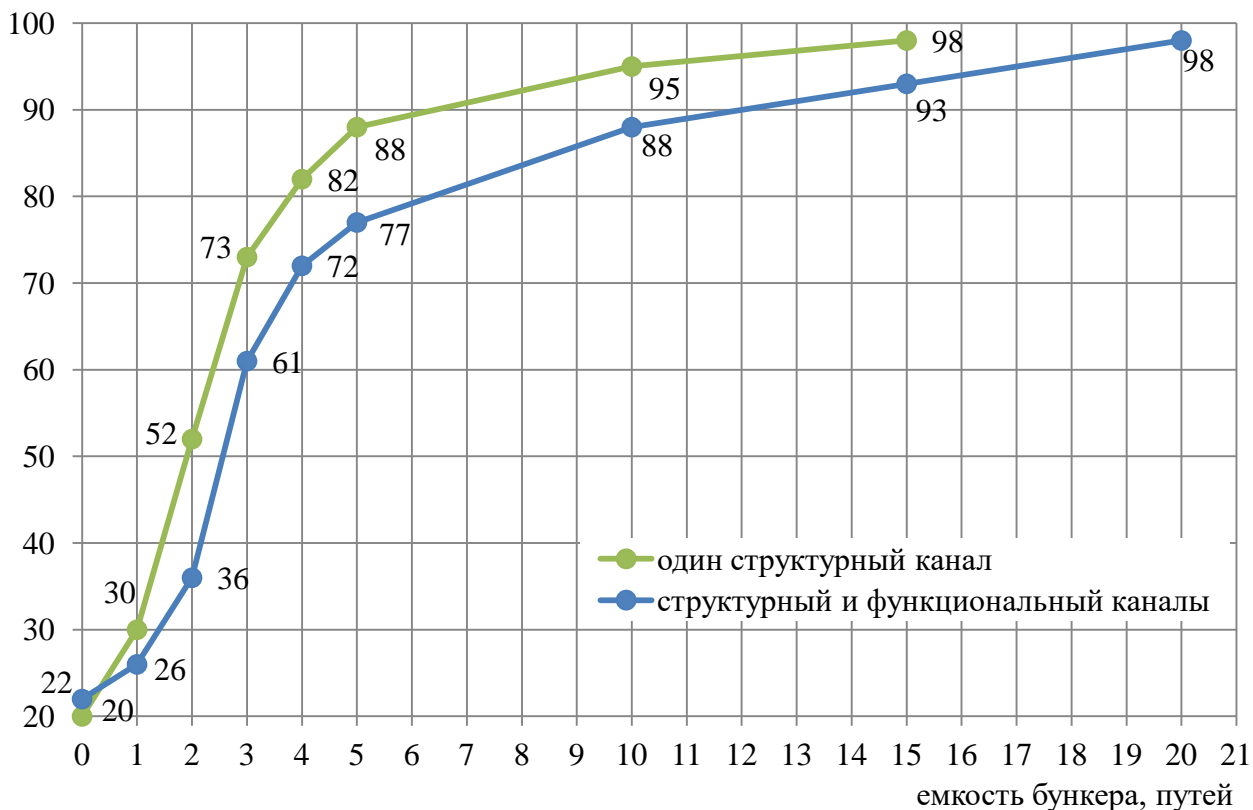


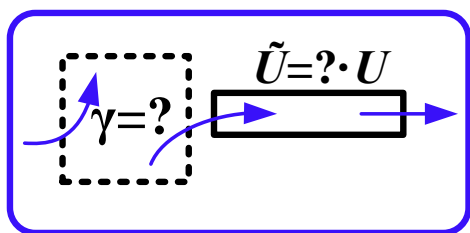
Рисунок 2. Возможный уровень загрузки горки при разной емкости предгорочного парка

Из этого следует, что расчетным элементом должен быть *канало-бункер* или *дуплекс* (рисунок 3). Это существенно меняет отображение взаимодействия элементов в транспортной системе и природу методов расчета.

Пропускная способность горловины определяется в существующих инструкциях по 100%-ной загрузке одной, наиболее загруженной, стрелки. Расчеты на моделях показали, что такой подход не верен, стрелку загрузить на 100% нельзя, поскольку возникают структурные потери (задержки из-за других стрелок, входящих в маршрут движения) и технологические (нет готового передвижения) (рисунок 4).

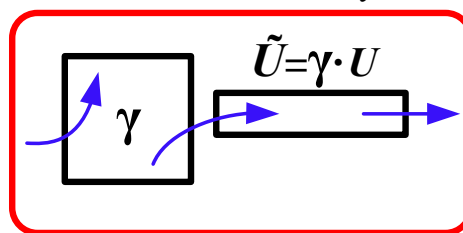
Некорректно рассчитываются и задержки в горловинах при пересекающихся маршрутах. Рассчитанные по формулам и фактические задержки (проверенные на моделях) отличаются в несколько раз (рисунок 5).

Расчетный элемент «канал»



\tilde{U} – реальная пропускная способность (неизвестна)
 U – предполагаемая при $v_n = 0, v_k = 0$

Расчетный элемент «дуплекс»



Реальная пропускная способность известна при $v_n > 0, v_k > 0$

v_n – коэффициент вариации потока, v_k – коэффициент вариации канала

Рисунок 3. Изменение основного расчетного элемента

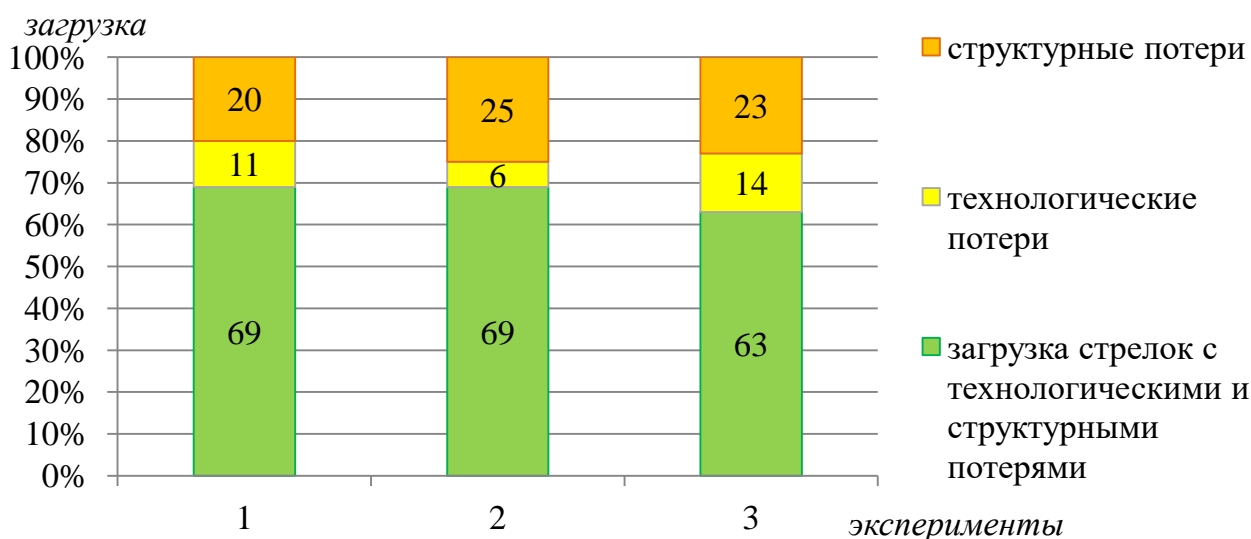


Рисунок 4. Полезная загрузка стрелок и структурно-технологические потери

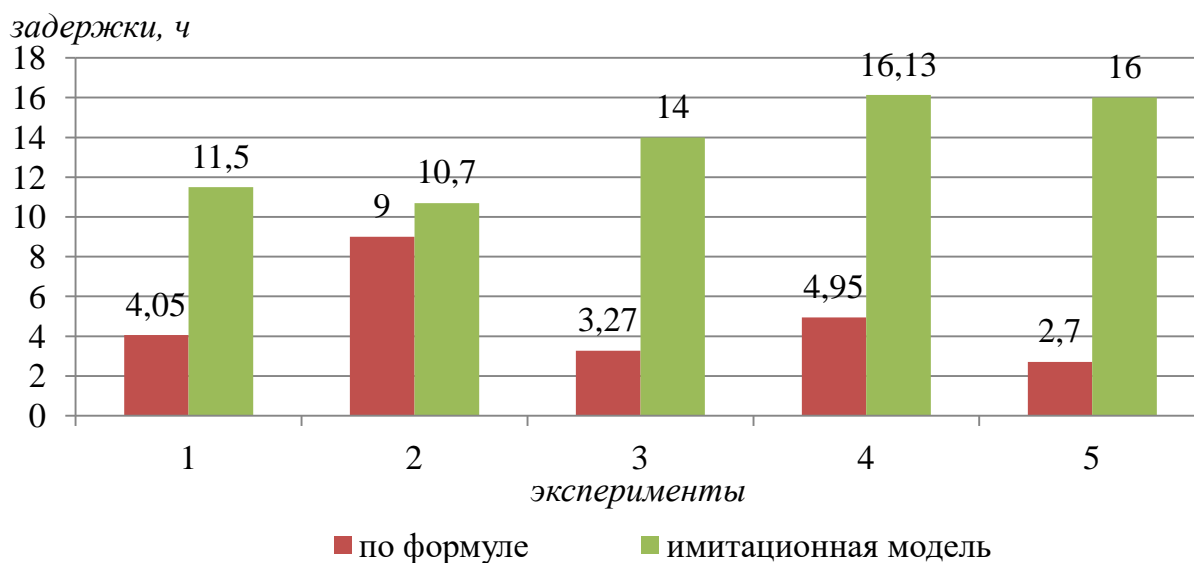


Рисунок 5. Задержки из-за стрелок в горловинах разных станций

Пропускная способность участка в инструкциях определяется по перегону с наименьшим значением этого параметра. В главе показано, что участок следует рассматривать как *совокупный дуплекс* (на половине промежуточных станций (разъездов, обгонных пунктов) поезда стоят по неприему технически) и схему расчета необходимо корректировать.

Предложена следующая классификация дуплексов.

1. *Дуплекс с распределенной емкостью* (рисунок 6). При нехватке путей на технической станции поезда задерживают на промежуточных. Бункеры на технической и на промежуточных станциях работают согласованно:

$$Q \equiv Q_i \wedge Q_j \wedge Q_{j+1} \wedge Q_{j+2}, \quad (1)$$

где Q – суммарная емкость дуплекса с распределенной емкостью;

Q_i – емкость i -того бункера, входящего в дуплекс;

$J \equiv \{j\}$ – множество промежуточных станций с резервными путями.

Суммарная емкость будет равна

$$\tilde{Q}(t) = Q_i(t) + \sum_j Q_j(t - \tau_{ij}), \quad (2)$$

где $\tilde{Q}(t)$ — фактическая суммарная емкость дуплекса с распределенной емкостью в момент t (τ_{ij} может колебаться);

τ_{ij} — время хода от j -й станции.

Уровень возможной загрузки зависит в общем случае от емкости бункера и степени случайного разброса в потоке и обслуживании:

$$\gamma = f(Q, v_{\Pi}, v_{\kappa}). \quad (3)$$

где v_{Π} – коэффициент вариации потока;

v_{κ} – коэффициент вариации времени обслуживания в канале;

Q – емкость перед каналом.

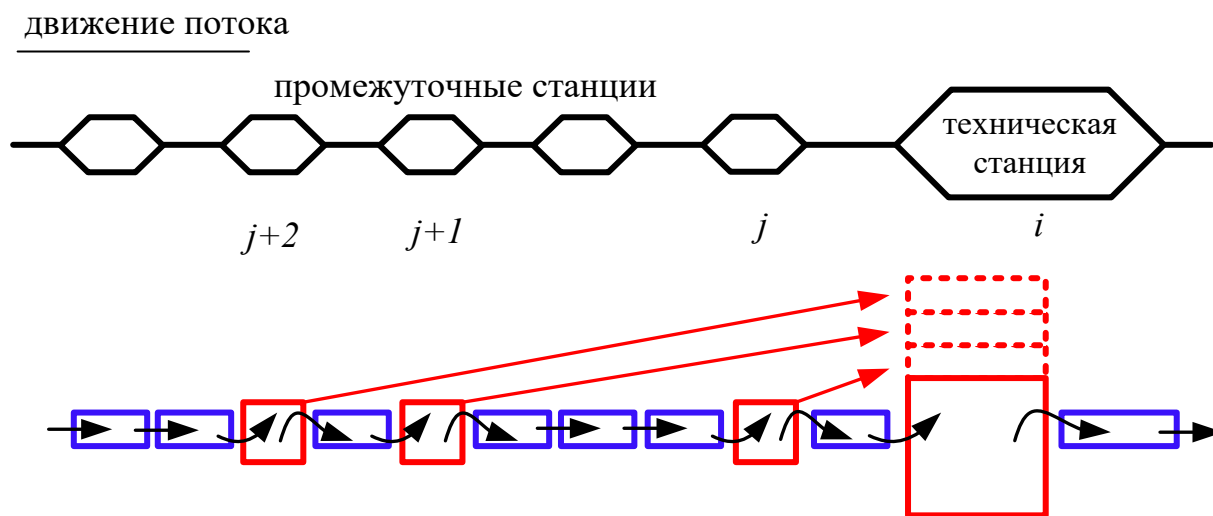


Рисунок 6. Дуплекс с распределенной емкостью

2. *Дуплекс с распределенным каналом.* Например, при занятости технической станции смену локомотива или бригады переносят на одну из ближних (предузловых) станций (рисунок 7).

Совместную работу технической и выделенных промежуточных станций можно логически выразить так:

$$U \equiv U_i \wedge U_j \wedge U_{j+1} \wedge U_{j+2}. \quad (4)$$

Пропускная способность объединенного структурно-функционального канала будет равна

$$\tilde{U}(t) = U_i(t) + \sum_j U_j(t - \tau_{ij}). \quad (5)$$

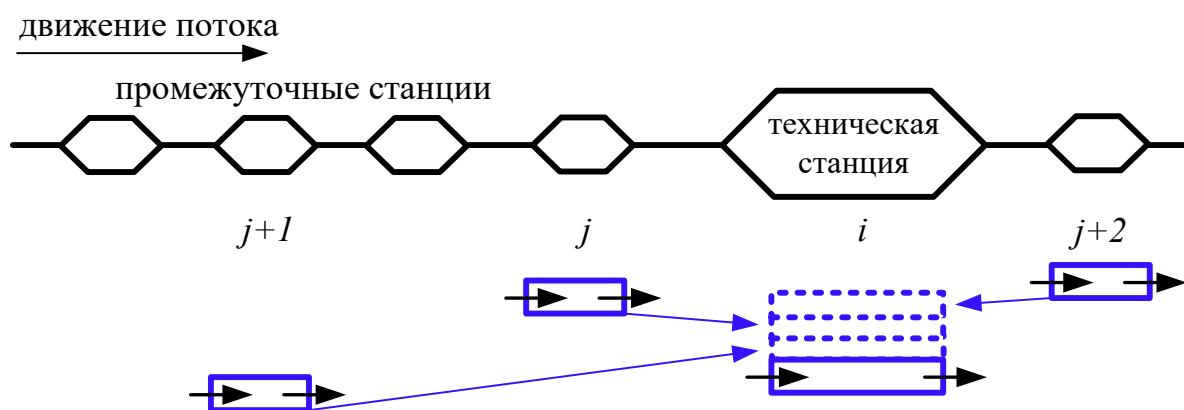


Рисунок 7. Дуплекс с распределенным каналом

3. *Дуплекс с функциональным наложением* (рисунок 8). Это выполнение в одном парке различных технологических операций.

Здесь Q – емкость парка отправления

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (6)$$

Требуемая емкость парка в момент t

$$\tilde{Q}(t) = \sum_i Q_i(t), \quad (7)$$

$$\bar{Q} < \tilde{Q}(t) < Q. \quad (8)$$

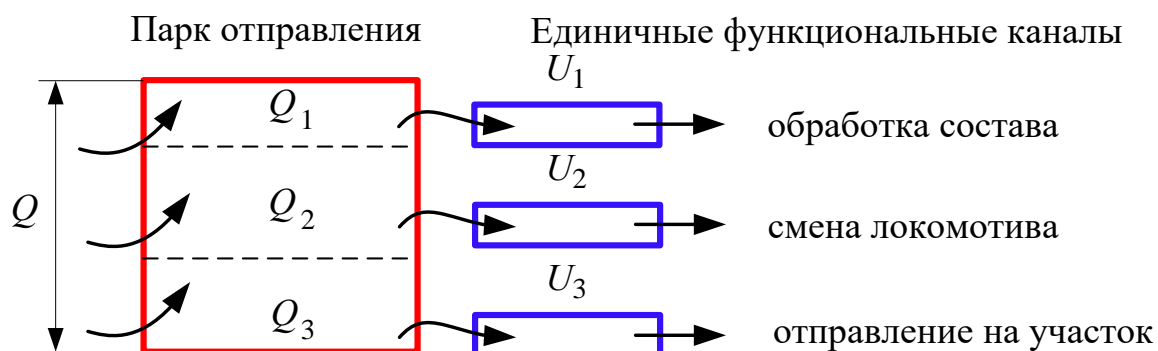


Рисунок 8. Дуплекс с функциональным наложением

Всплески потока по трем каналам могут не совпадать, поэтому $\tilde{Q}(t)$ может быть и меньше и больше Q , так что требуемую суммарную емкость нельзя получить простым суммированием исходных емкостей.

Почти всегда участок одновременно является и распределенным каналом и распределенный бункером. Параметры таких сложных дуплексов трудно рассчитать аналитически, корректным аппаратом расчета полигонов может служить только имитационное моделирование.

Предложено понятие «гармонично построенный полигон» – тот, который удовлетворяет условию равенства пропускных способностей всех дуплексов

$$\forall_i | \gamma_i \cdot U_i = const. \quad (9)$$

где U_i – максимально допустимая пропускная способность i -го канала,

γ_i – коэффициент полезной загрузки i -го канала. Он характеризует возможности бункера по преобразованию потока из случайного (неудобного для канала) в управляемый (удобный).

Разработаны *основные стратегии* структурно-функциональной оптимизации полигонов. По каждой стратегии возникает множество потенциально оптимальных вариантов (множество Парето). Введем обозначения:

Q_i – емкость бункера перед каналом;

\tilde{U} – реальная пропускная способность дуплекса;

r_i^q – удельные капитальные затраты на строительство;

r_i^u – удельные текущие расходы на эксплуатацию;

R – выделенные инвестиции на строительство (реконструкцию);

u_i – i -тая струя вагонопотока;

τ_i – время пропуска i -той струи.

Стратегия I – Оптимизация по критерию «максимум пропускной способности». Элементами расчетного полигона являются дуплексы. Пропускную способность дуплекса можно увеличить, изменяя либо канал, либо бункер, либо оба вместе (рисунок 9).

Множество Парето будет иметь вид

$$Z_I \equiv \{\Delta Q_i, \Delta U_i\}. \quad (10)$$

При этом должно выполняться условие «гармонично построенный полигон»

$$\forall_i | (\gamma_i + \Delta\gamma_i) (U_i + \Delta U_i) = \tilde{U}_I = const. \quad (11)$$

Стратегия I

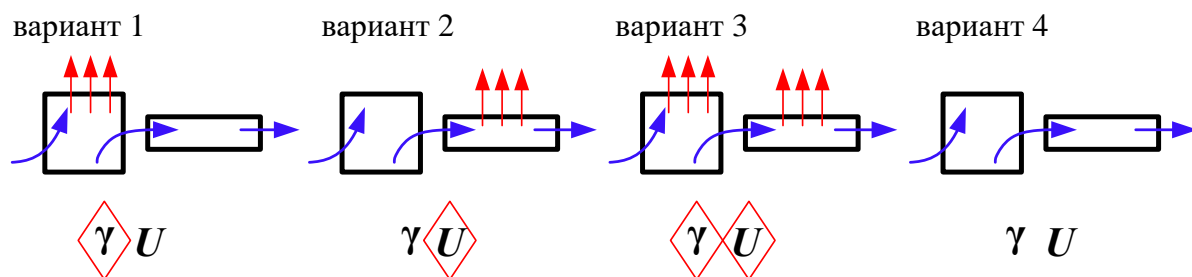


Рисунок 9. Расчетная схема полигона в стратегии I

Имитационный спуск упорядочивает множество Парето

$$\{\Delta Q_i, \Delta U_i\} \Rightarrow \langle \Delta Q_i, \Delta U_i \rangle. \quad (12)$$

Критерий

$$\tilde{U}_I \Rightarrow \max. \quad (13)$$

Ограничение – величина возможных инвестиций

$$\sum_i (\Delta Q_i r_i^q + \Delta U_i r_i^u) \leq R_I. \quad (14)$$

Стратегия II. Оптимизация по критерию «максимум скорости пропуска потока». Расчетная схема полигона представляет собой последовательность каналов, поскольку изменяться будут только они (рисунок 10).

Множество Парето будет

$$Z_{II} \equiv \{\Delta U_i\}. \quad (15)$$

Имитационный спуск преобразует множество

$$\{\Delta U_i\} \Rightarrow \langle \Delta U_i \rangle. \quad (16)$$

Стратегия II



Рисунок 10. Расчетная схема полигона в стратегии II

Критерий – минимум суммарного времени продвижения потока по полигону

$$\sum_i \sum_j u_{ij} \tau_{ij} \longrightarrow \min . \quad (17)$$

Ограничение накладывается предельной величиной затрачиваемых средств (приведенных – по инвестициям и текущим затратам)

$$\sum_i (\alpha R_i + r_i) \leq R_{max} . \quad (18)$$

Стратегия III. Оптимизация по критерию «минимум затрат». Расчетный полигон состоит из дуплексов. Здесь также можно изменять и каналы, и бункеры (рисунок 11).

Множество Парето

$$Z_{III} \equiv \{\Delta Q_i, \Delta U_i\} . \quad (19)$$

Имитационный спуск

$$\{\Delta Q_i, \Delta U_i\} \Rightarrow \langle \Delta Q_i, \Delta U_i \rangle . \quad (20)$$

Условие

$$\forall_i |(\gamma_i + \Delta \gamma_i) (U_i + \Delta U_i) = \tilde{U}_{III} = const . \quad (21)$$

Критерий

$$\sum_i (\Delta Q_i r_i^q + \Delta U_i r_i^u) \Rightarrow \min . \quad (22)$$

Ограничение – обеспечение минимальной скорости продвижения потока (предельное суммарное время продвижения потока по полигону)

$$\sum_i \sum_j u_{ij} \tau_{ij} \leq (\sum_i \sum_j u_{ij}) T . \quad (23)$$

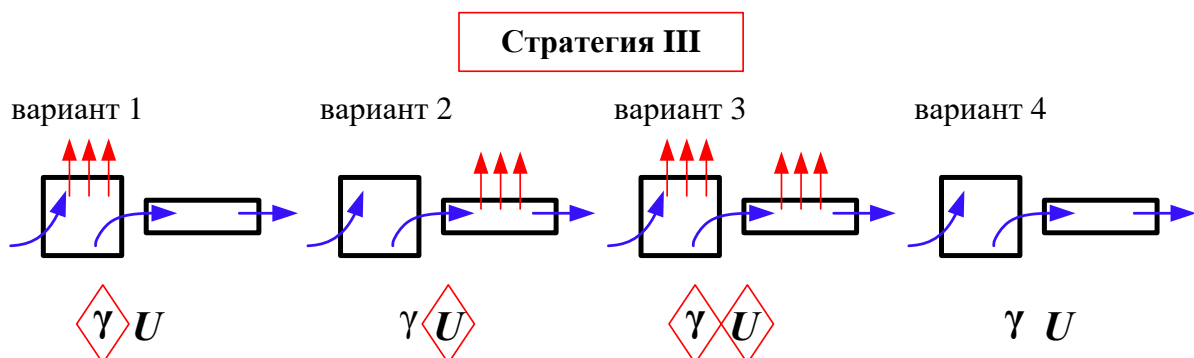


Рисунок 11. Расчетная схема полигона в Стратегии III

Узкое место полигона меняется при изменении основной поставленной задачи. В общем случае, узкое место – это элемент, в наибольшей степени затрудняющий выполнение поставленной задачи.

Для стратегии 1 «Максимальная пропускная способность полигона» узким местом будет дуплекс с наименьшей пропускной способностью — именно дуплекс, а не канал.

Для стратегии 2 «Достижение максимальной скорости пропуска потока» узким местом будет канал, вызывающий наибольшие задержки. Этот канал в наибольшей степени снижает скорость пропуска потока, тем самым затрудняет решение поставленной задачи.

Для стратегии 3 «Функционирование полигона с наименьшими затратами» узким местом будет дуплекс, вызывающий наибольшие стоимостные потери при пропуске потока. В данном случае этот элемент больше всего затрудняет достижение поставленной цели.

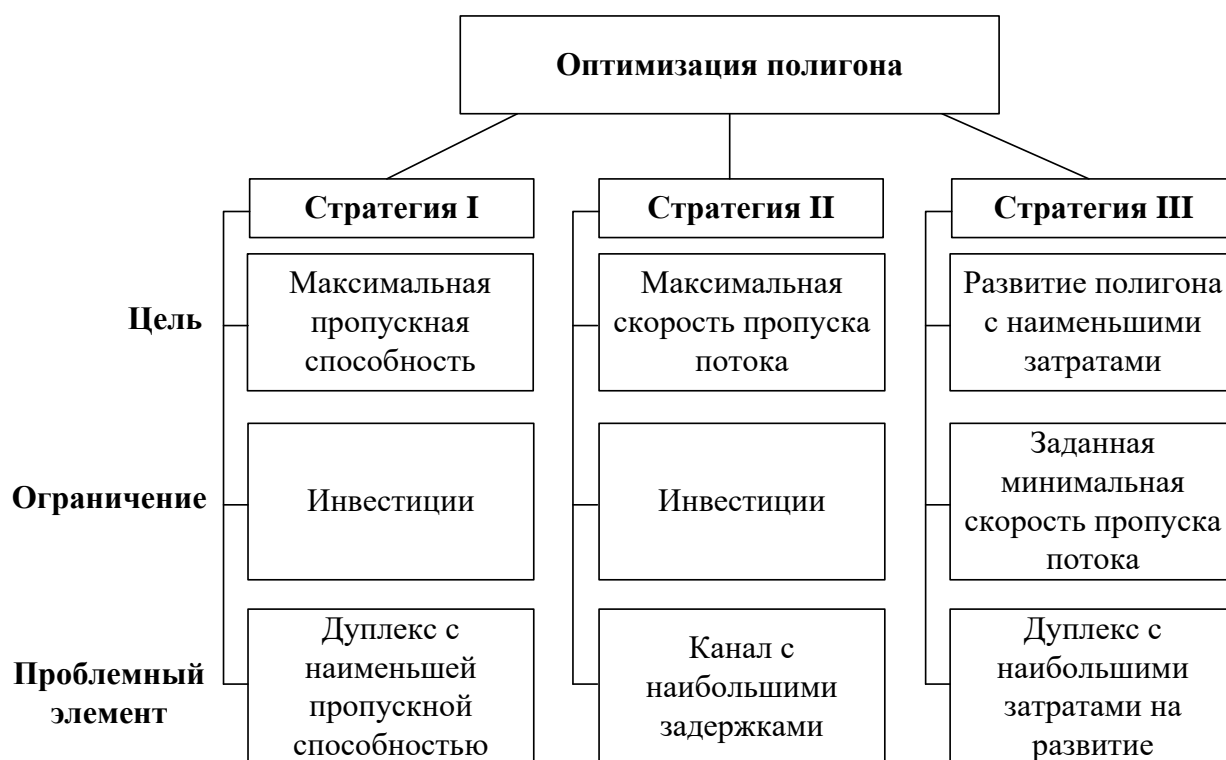


Рисунок 12. Оптимизация полигона

В главе 3 «Принципы макро моделирования полигонов» рассмотрены задачи и подходы для отображения парков, горловин и участков. Сформулированы принципы построения моделей полигонов, сравнения вариантов и поиска наилучшего по принципам «имитационного спуска». *Область применения укрупнённого моделирования* – комплексная оценка соответствия инфраструктуры и технологии работы на полигонах и участках, а также в узлах. Укрупнённая модель позволяет найти проблемные станции и перегоны в составе железнодорожных направлений, ограничивающие пропускную и перерабатывающую способность, и проверить, каким образом и в какой мере ограничения могут быть

устранены. С помощью укрупнённой модели определяются узкие места всего направления, места точечных вложений для сбалансированного развития полигона. Укрупнённая модель в качестве результата должна выявлять недостаточно развитые станции и линии, показывать, какие они должны иметь параметры при увеличенной пропускной и перерабатывающей способности. *Область применения подробного моделирования* – это оценка изменений структуры и технологии работы технических станций. Подробная модель позволяет учесть все детали работы, варианты адаптивной технологии и управляющие решения.

Задачи моделирования можно подразделить на три основные группы.

1. Реализация на модели существующего объекта в реальных условиях с целью получения информации для всестороннего исследования.

2. Реализация на модели существующего объекта при максимально возможном входном потоке с целью определения его максимальной пропускной и перерабатывающей способности.

3. Построение модели реконструируемого или проектируемого объекта с целью оценки его пропускной и перерабатывающей способности и показателей работы.

На имитационных моделях решаются следующие *основные задачи по сравнению вариантов* проектирования и реконструкции:

1. Определение количества отдельных пунктов на участке и их местоположения, а также их типов (поперечный, полупродольный, продольный, комбинированный) применительно к местным условиям, технологии работы и размерам движения.

2. Определение необходимого количества путей и их вместимости: главных, приёмо-отправочных, ходовых, сортировочных, и т.д.

3. Поиск оптимальных схемных решений по конфигурации горловин.

4. Сравнение вариантов реконструкции и развития существующих парков и строительства новых.

5. Разработка рационального технологического процесса для выбранной схемы путевого развития.

6. Определение наличной пропускной и перерабатывающей способности объекта, в том числе при различном распределении входного потока по категориям поездов и их количеству.

7. Выявление причин повышенного простоя вагонов и поездов и его сокращение за счёт изменения технологии работы или структуры объекта.

8. Определение рациональной потребности в технических средствах и обоснование их необходимости (локомотивы, бригады, стационарные средства закрепления, опробования тормозов, грузовые устройства и т.д.).

9. Обоснование возможности примыкания новых, либо увеличения объё-

мов работы существующих подъездных путей к станциям, для обеспечения бесперебойной работы.

10. Выявление и ликвидация «узких мест», ограничивающих продвижение потока.

11. Проверка возможности освоения перспективного поездо- и вагонопотока. В случае невозможности освоения – выработка предложений по изменению технологии работы или структуры объекта.

12. Определение этапов строительства, их продолжительности и технологии работы на каждый из этапов для обеспечения пропуска потоков на переходные периоды реконструкции.

Сравнение вариантов развития железнодорожных станций и линий с определением наилучшего варианта выполняется при помощи технико-экономического обоснования. В новой постановке необходимо определить общую пропускную способность полигона, но проблемные зоны (места) можно определять укрупненно. Если вагонопотоки замедляются станциями, то достаточно знать, какими горловинами и парками, и не нужно выделять конкретные стрелки. А на втором этапе, когда надо будет переустраивать уже конкретную станцию, следует применять подробное моделирование.

При моделировании парков важно показать их основные свойства – бункер для накопления потока в ожидании обслуживания и функциональный канал во время обслуживания. Подвижной единицей в модели полигона становится не вагон, а поезд. Поездотоки с переработкой на технических станциях трансформируются из поездов в вагоны. При формировании накопленного поезда происходит обратный переход. Для горловин стоит задача учесть в модели только пропускную способность без дальнейшей детализации. При функциональном подходе основным параметром горловины будет число возможных параллельных передвижений. Для отображения следования поездов по перегонам в диссертации разработаны особые алгоритмы.

При исследовании участков и полигонов предусматривается следующая *последовательность действий* (рисунок 13).

1. Строится укрупнённая имитационная модель полигона, участка или узла (макромодель). Такая модель необходима для создания комплексных программ и планов развития полигонов с целью их равномерного и сбалансированного развития для пропуска поездов.

2. Проводятся расчёты при существующих поездопотоках. Выдаётся полная характеристика полигона со всеми показателями.

3. Проводится цикл расчётов на возрастающие поездопотоки. Определяются проблемные станции и участки.

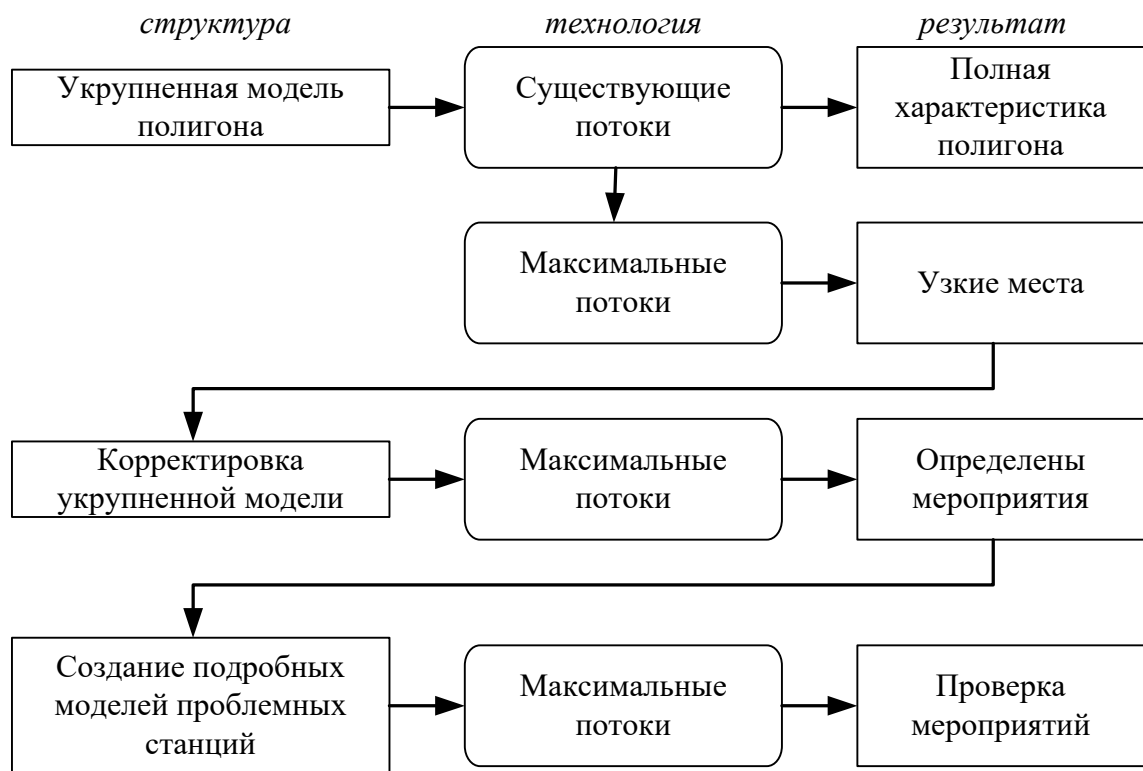


Рисунок 13. Последовательность исследования проектов развития полигонов

4. Имитируется реконструкция проблемных станций, и определяются их укрупнённые параметры (ёмкость парков, пропускная способность горловин, мощность сортировочной горки и др.)

5. Разрабатывается проект реконструкции проблемных станций.

6. Строятся подробные модели реконструируемых станций, и проводится их полноценное структурно-технологическое исследование. В подробных проектах должны быть реализованы требуемые параметры станций, рассчитанные ранее на укрупнённой модели полигона.

В главе 4 «Технология моделирования полигонов» описаны особенности макро моделирования больших транспортных систем в отличие от подробной имитации станций. Разработана технология расчета и оптимизации полигонов с использованием имитационной системы ИМЕТРА. Система позволяет адекватно отображать структуру и технологию станций и участков в полигонах и может быть принята в качестве основного аппарата для имитационной экспертизы проектов развития железнодорожной инфраструктуры. Система позволяет автоматизировано задавать структуру и технологию работы полигона. Для этого предусмотрены специальные блоки (парки, соединения между ними, технологические операции). Каждый из них предусматривает ряд полей, заполняя которые пользователь указывает всю необходимую исходную информацию о структуре, технологии, потоках, ритме поступления операций, диспетчерском

управлении, приоритетах и т.д (рисунок 14). Блоки соединяются между собой в нужном порядке. В процессе моделирования имитируются передвижения и операции в парках, отслеживается занятость элементов, подсчитываются показатели. По результатам моделирования выполняется структурно-технологическое исследование, задачей которого является определение того, как и в какой мере взаимодействие структуры и технологии влияет на пропускную и перерабатывающую способность, время нахождения вагонов, степень и характер использования технических средств.

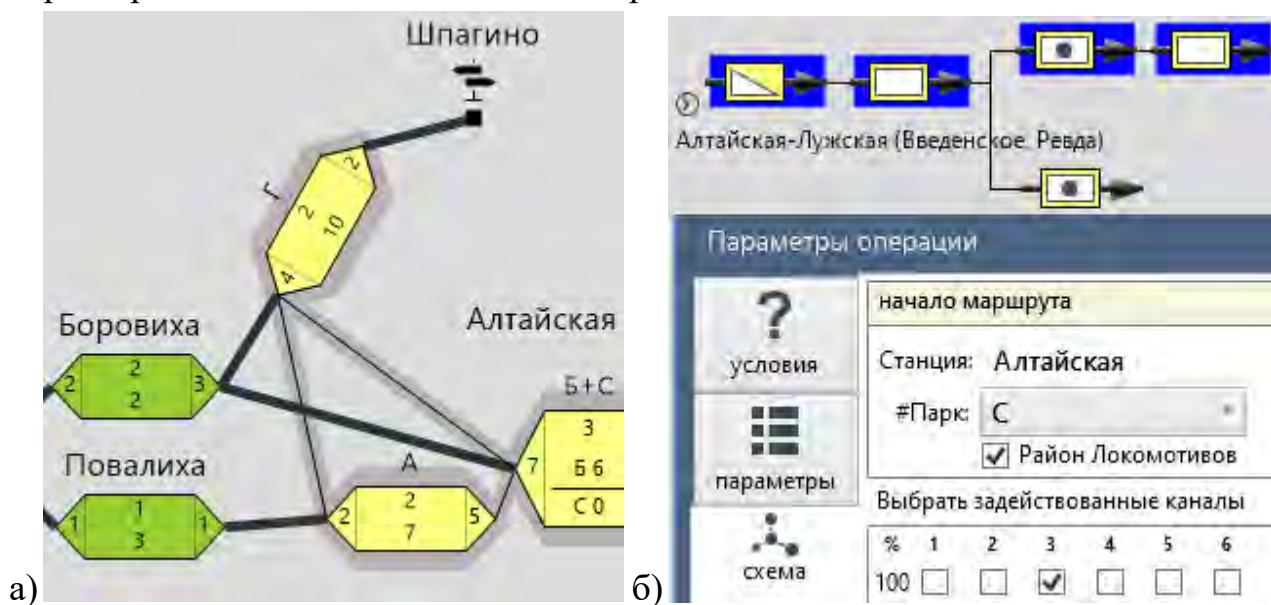


Рисунок 14. Редактор схемы и технологического процесса

Сравнение вариантов выполняется следующим образом (рисунок 15). Для каждого варианта создаётся отдельная (либо корректируется исходная) имитационная модель. Между собой модели отличаются схемой путевого развития и/или технологией работы.

В первую очередь выявляются работоспособные и неработоспособные варианты, исходя из того, переработан ли в очередном прогоне модели прогнозируемый поездо- и вагонопоток. Уменьшение задержек и ликвидация «узких мест» возможны за счёт изменения технологии работы или ресурсов. Если технологические мероприятия не позволяют устранить «узкое место» – следует внести изменения в путевое развитие. Если это пути парков, то надо увеличить их количество. Если это стрелочные секции в горловинах – необходимо увеличить параллельность выполняемых передвижений (секционировать горловину). Для всех работоспособных вариантов при одинаковом входном потоке выявляются «узкие места». Их устранение позволяет технологически улучшить первоначальные варианты. Все изменения в первоначальных вариантах, давшие положительный технологический эффект, необходимо в дальнейшем рассматривать отдельными дополнительными вариантами.

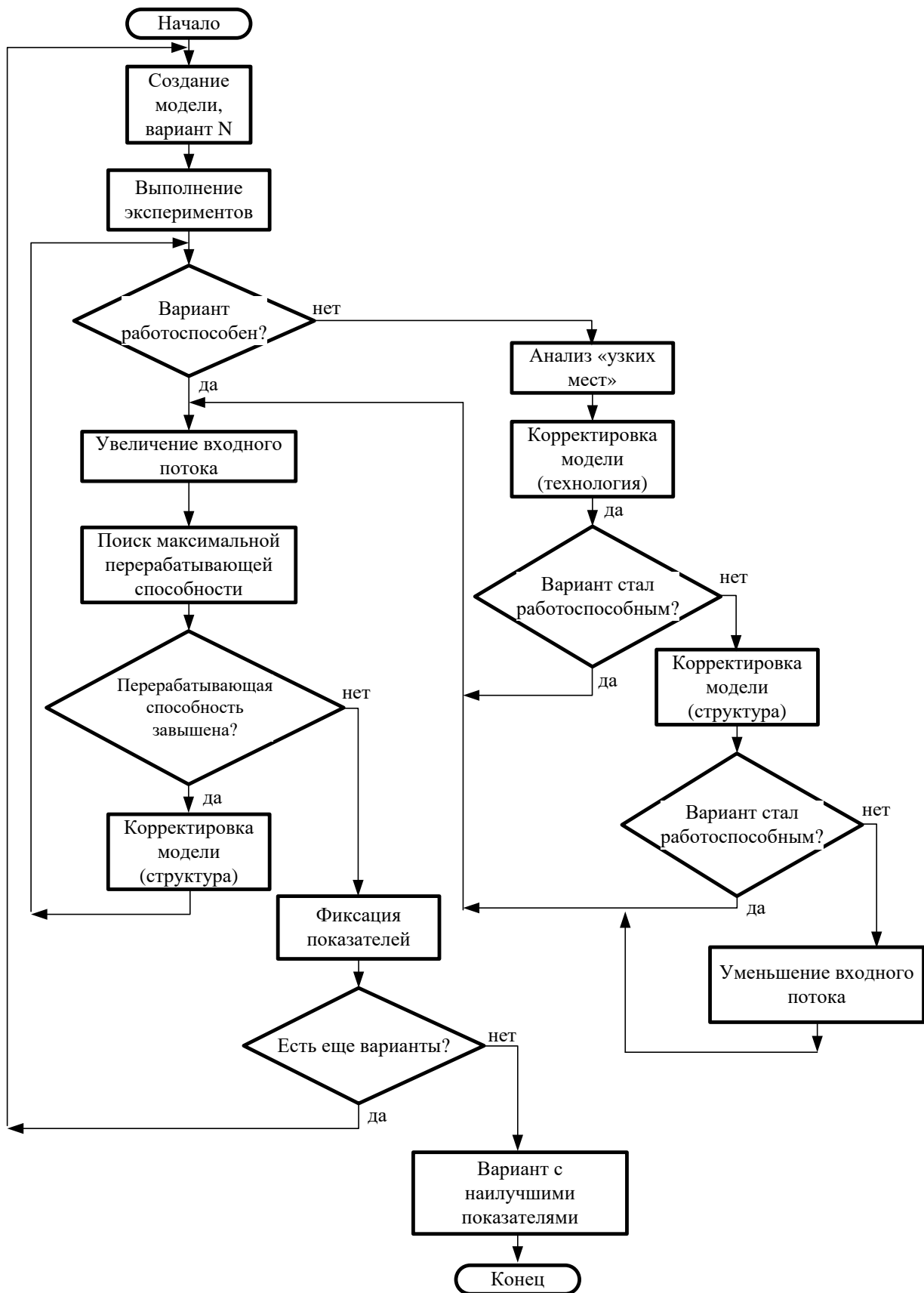


Рисунок 15. Алгоритм выбора рационального варианта проекта развития

В случае поэтапного роста потоков целесообразно предусмотреть и поэтапное развитие объекта. Тогда на каждый этап создаётся свой вариант (вари-

анты) имитационной модели, отличающиеся структурой и потоками. Разные варианты внутри одного этапа следует так же сравнивать между собой при одинаковом входном потоке, но каждый из них должен обеспечивать переработку прогнозируемого потока на данном этапе.

Таким образом, в результате выполнения полного цикла расчётов будут исключены неработоспособные варианты, а из оставшихся – получен вариант с наилучшими технологическими показателями. Как правило, лучшим считается вариант пропуска наибольших потоков при меньшем количестве ресурсов и с минимальными потерями.

С помощью системы ИМЕТРА построена модель полигона Кузбасс – Северо-запад, расположенного между станциями Алтайская и Лужская, включающая 283 станции, из которых 25 станций смены локомотивов и/или локомотивных бригад. Общая протяженность полигона составляет 4699 км.

Для сравнения вариантов экспериментов система выдает исчерпывающий набор структурных и технологических параметров полигона, в том числе:

- пропущенный поездопоток;
- задержки поездов по причинам и структурным элементам (рисунок 16);
- технические и участковые скорости движения по участкам и маршрутные скорости по дорогам;
- исполненный график движения поездов с отображением работы локомотивов (рисунок 17) и др.

Ход любого эксперимента на модели можно просмотреть в динамике – поезда перемещаются по схеме полигона в режиме ускоренного времени.

Модель позволяет наглядно увидеть, по каким причинам поезда простаивают на станциях. Например, задержки на станции Балезино распределяются следующим образом (см. рис. 16). Из-за бригад по обработке составов – 22,7 мин. на один поезд в нечетном направлении и 18,2 мин. в четном; в ожидании локомотива – 10,8 мин. и 9,8 мин; из-за занятости участка – 27,9 мин. и 16,6 мин; из-за нехватки путей на следующей технической станции – 5,9 мин. и 4,1 мин.

Проведенный сравнительный анализ реальных показателей работы полигона и рассчитанных моделью позволяет сделать вывод о корректности метода расчета и имитационной системы ИМЕТРА. В дальнейшем на этой модели проведены эксперименты по оптимизации полигона.

В главе 5 «Оптимизация по параметрам потока» рассматриваются два критерия – «максимум пропускной способности» и «максимум скорости пропуска потока».

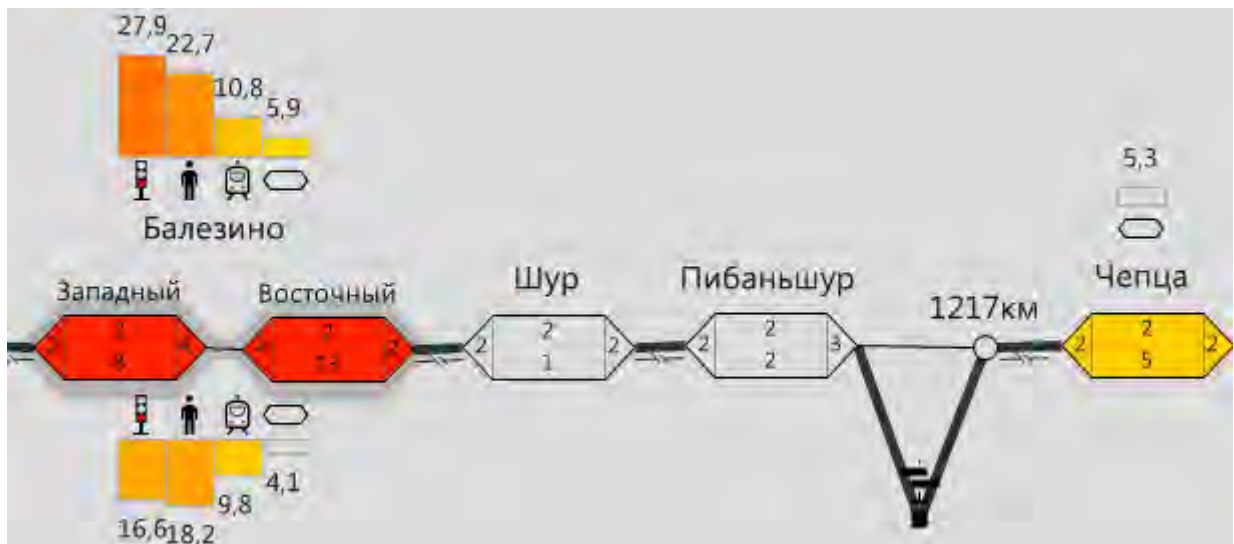


Рисунок 16. Задержки поездов на станциях

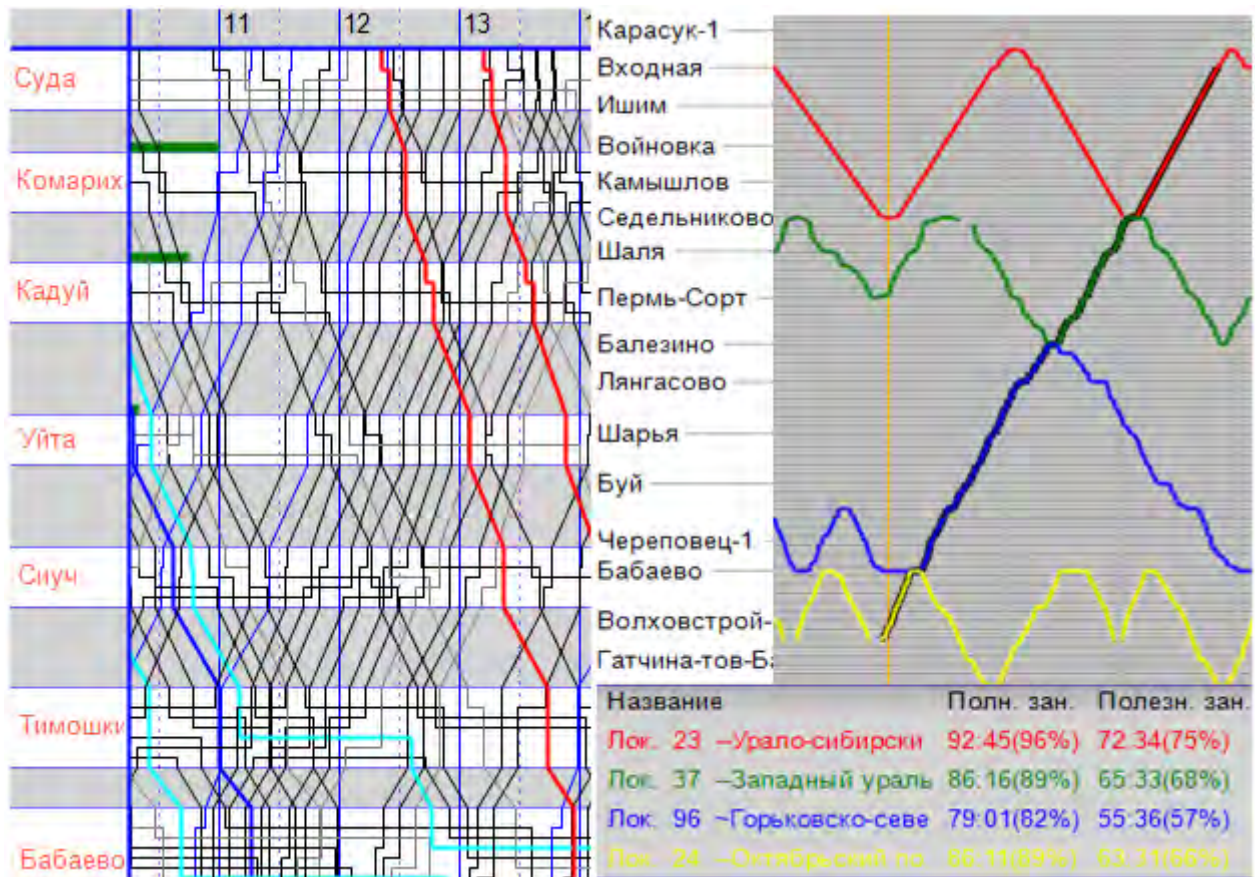


Рисунок 17. Исполненный график движения поездов с параметрами локомотивного обслуживания

Для первого варианта разработана логическая последовательность действий:

- оценить существующую пропускную способность, увеличивая поездопоток до предела;
- сделать анализ задержек поездов по видам поездопотока;

- проанализировать возникающие структурные и функциональные ограничения;
- определить проблемные дуплексы (станции и участки);
- рассчитать с использованием технологии имитационного спуска рациональную последовательность реконструктивных мероприятий до достижения уровня «гармонически построенный полигон».

На примере показано, как важно правильно выбрать границы моделируемого участка. При добавлении в модель участка технических станций, его ограничивающих, результаты расчетов значительно изменяются.

Для критерия «максимум скорости пропуска потока» проблемным местом будет канал с наименьшей пропускной способностью. Однако развивать придется целую группу ограничивающих каналов. Здесь предлагается такой подход. Сначала рассмотреть функциональные каналы, а только потом – структурные. Увеличить пропускную способность первых значительно легче.

Модель показала, что наиболее существенными являются задержки из-за бригад по обработке составов, это функциональные каналы. Вот как выглядят задержки на одной из станций полигона (рисунок 18), из-за бригад ПТО вагонов в нечетном направлении на каждый состав приходится 61 мин. На подходах к станции поезда задерживаются в целом на 30 часов в сутки.



Рисунок 18. Задержки поездов на ст. Лянгасово

При увеличении числа бригад снизилась занятость путей (с 80 до 50%), уменьшились простои поездов по неприему (с 47 до 21 минуты в среднем на поезд) и увеличилась участковая скорость на прилегающих участках (на 1,5 – 3 км/ч в зависимости от направления).

Другой пример – станция Лоста, на которой высоки задержки из-за бригад – 21.2 минуты на поезд (рисунок 19). Но еще больше – из-за впереди лежащего участка – 52.9 минуты на поезд. Увеличение штата ПТО вагонов привело к неожиданным результатам. Задержки из-за бригад, естественно, исчезли. Но резко увеличились задержки из-за участка – с 52.9 до 63.7 минуты на поезд. Возросли и общие задержки – с 95.8 до 103.9 минут на поезд. При изменении темпа обработки поездов изменились ритмы отправления, работа горловин и участка нечетного направления. Общие простои поездов на станции при увеличении штата ПТО вагонов не изменились, причиной задержек вместо бригад стал участок.

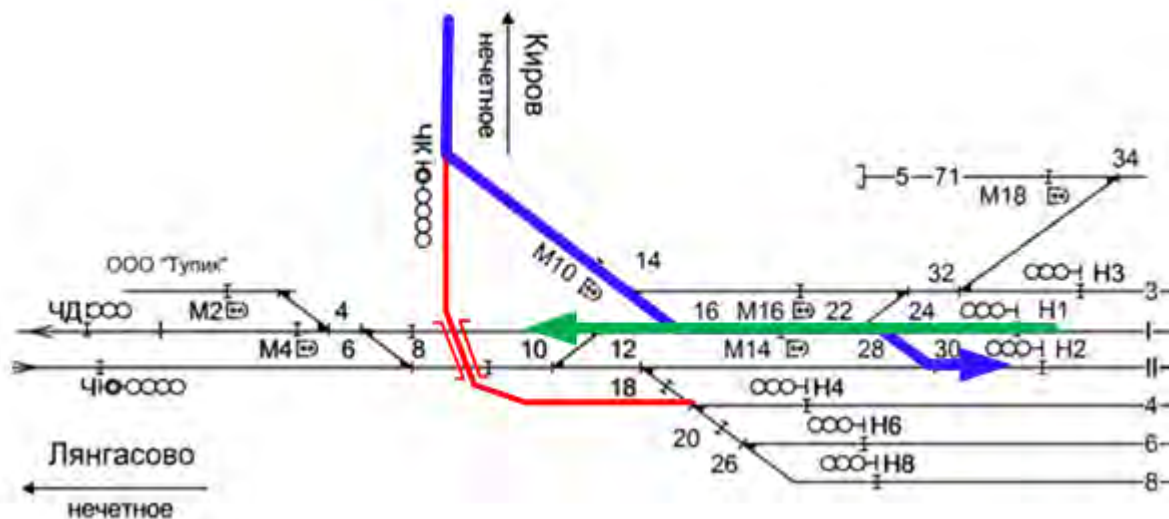


Рисунок 19. Задержки поездов на ст. Лоста

В целом на ряде станций увеличение количества функциональных каналов влечет заметное снижение уровня задержек, уменьшая непроизводительные простои. На других станциях задержки из-за бригад ПТО перераспределяются на другие элементы и улучшения показателей не происходит. Полигон работает с высокой загрузкой, все процессы взаимосвязаны и предположения о возможных результатах вводимых изменений довольно трудно логически предсказать. Тем не менее, выполнив оптимизацию по тем станциям, на которых эффект от увеличения числа функциональных каналов заметен, можно повысить мар-

шрутные скорости движения поездов. Маршрутная скорость в результате эксперимента оказалась выше на 1,14 км/ч в нечетном направлении и на 0,62 км/ч в четном направлении.

Развитие структурных каналов требует значительных инвестиций. Например, устройство развязки в разных уровнях (рисунок 20) для ликвидации враждебных маршрутов. Задержки из-за горловины снизились с 6 минут на один поезд до одной минуты, скорость на прилегающем участке увеличилась на 0,75 км/ч.



зеленым – маршрут следования нечетных грузовых поездов, синим – нечетных пассажирских, красным – путепроводная развязка

Рисунок 20. Развязка на ст. Поздино

В главе рассмотрен и ряд других структурных решений, которые демонстрируют, какие типы структурных мероприятий можно обосновать при помощи модели полигона.

В этой же главе выполнена проверка эффективности увеличения ходовых скоростей движения пассажирских поездов. Проведены эксперименты по различным мероприятиям на полигоне по отдельности и в комплексе (увеличение штата ПТО с одновременным добавлением путей в парках, удлинение участков работы локомотивных бригад). Выявлены большие потенциальные резервы. Проводя различные эксперименты на модели полигона, и сопоставляя между собой полученные результаты, становится возможным находить и обосновывать рациональные мероприятия, позволяющие достичь необходимых параметров потока на полигоне.

Обобщив результаты экспериментов, удалось выявить следующую закономерность (рисунок 21). Чем больше задержек вызывает основной бункер (парк технической станции), тем большую емкость имеет распределенная часть бункера (увеличивается потребность в путях предузловых станций на участке).

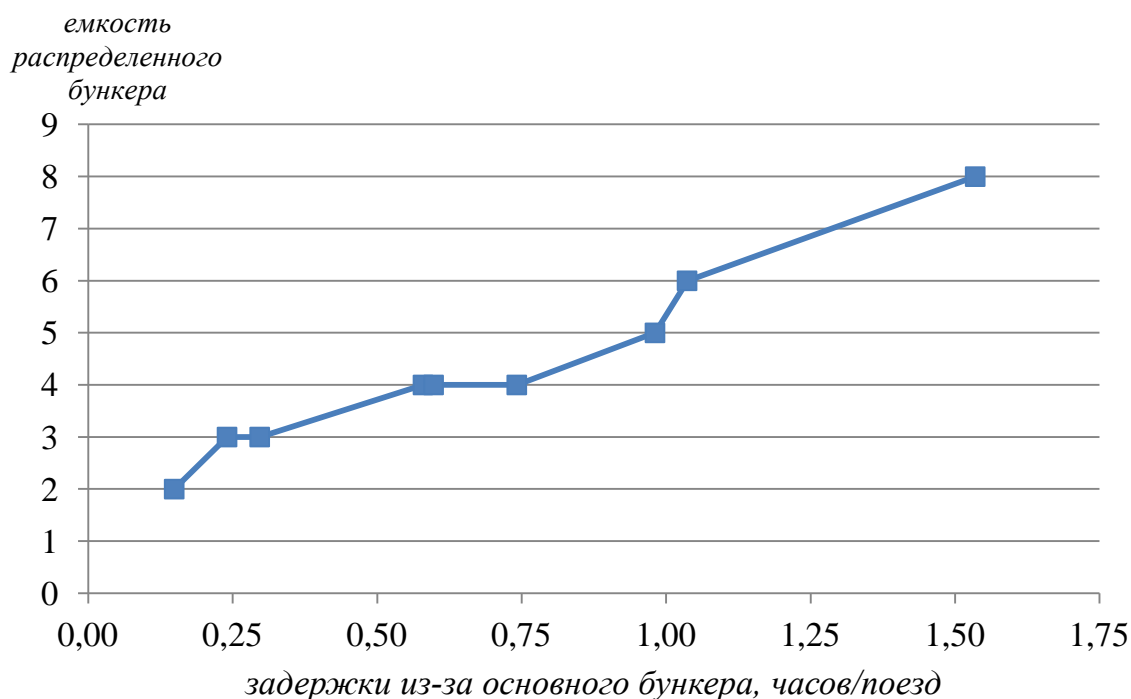


Рисунок 21. Емкость распределенной части бункера в зависимости от уровня задержек из-за основной части бункера

В главе 6 «Оптимизация по затратам» рассматривается проблема выбора оптимальной этапности развития главного полигона Свердловской железной дороги в связи с возрастанием тяжеловесного движения на период до 2025 г. При этом главной задачей было обеспечить пропуск планируемого потока с наименьшими инвестиционными затратами. Необходимо учитывать, что объем и стоимость работ на разных станциях отличается в разы. Удлинение путей на технических станциях зачастую приводит к существенной перестройке горловин и всей схемы парков. Создать инфраструктуру, способную пропустить заданный поездопоток, можно разными способами, так что на каждом этапе возникает своеобразное множество Парето конкурентоспособных вариантов. Многократно уменьшить число вариантов расчёта для достижения наилучших результатов позволяют особенности построения автоматизированной модели и специальный метод ускорения оптимизации – «имитационный спуск». Алгоритм проведения расчетов приведен на рисунке 22.

Он реализовывался следующим способом (рисунок 23). На этапе 1 реконструировалась станция на том участке, который в наибольшей степени замедляет пропуск потока (задержки 42 часа в сутки). Проводится следующий эксперимент с возросшим потоком (этап 2). Возникает другое распределение задержек. Выбирается станция на участке с наибольшими задержками (9.3 часа). И так далее до тех пор, когда заданный поток полностью пропускается (на восьмом этапе).

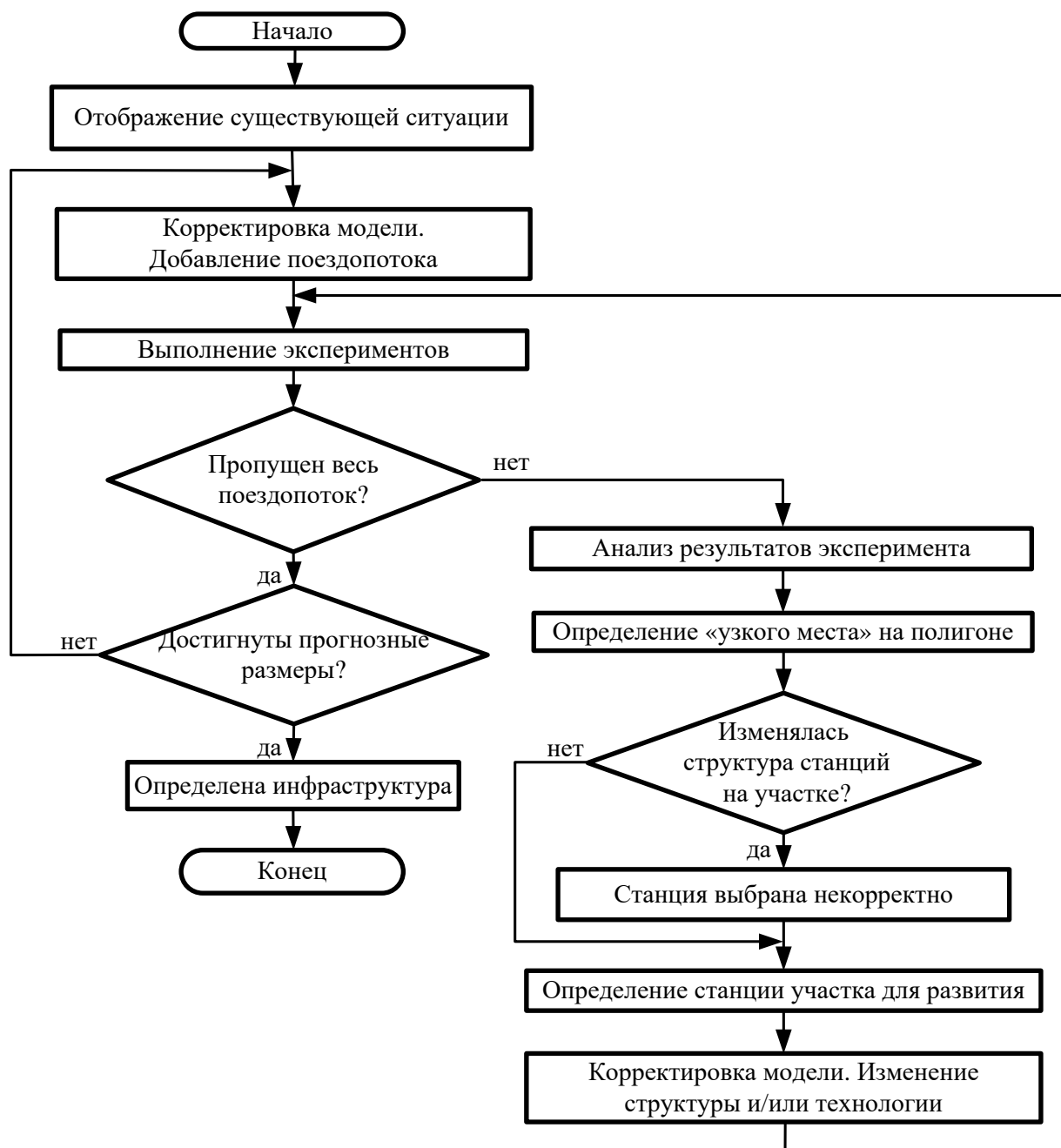


Рисунок 22. Схема поиска рациональной инфраструктуры

Использование имитационного моделирования с имитационным спуском позволило рассчитать реконструкцию полигона с большой экономией средств – при расчете по действующим аналитическим инструкциям для пропуска потоков 2025 г. необходимо реконструировать 21 станцию, а по расчетам на модели – только 15. Потенциальный эффект составил 1 млрд. 800 млн. рублей. Кроме этого, определена оптимальная этапность (последовательность) реконструкции станций, что позволяет вкладывать инвестиции с наибольшей отдачей. После реализации каждого последующего этапа появляется возможность увеличить провозную способность полигона. Проведенные на модели исследования положены в основу программы развития полигона Свердловской железной дороги.

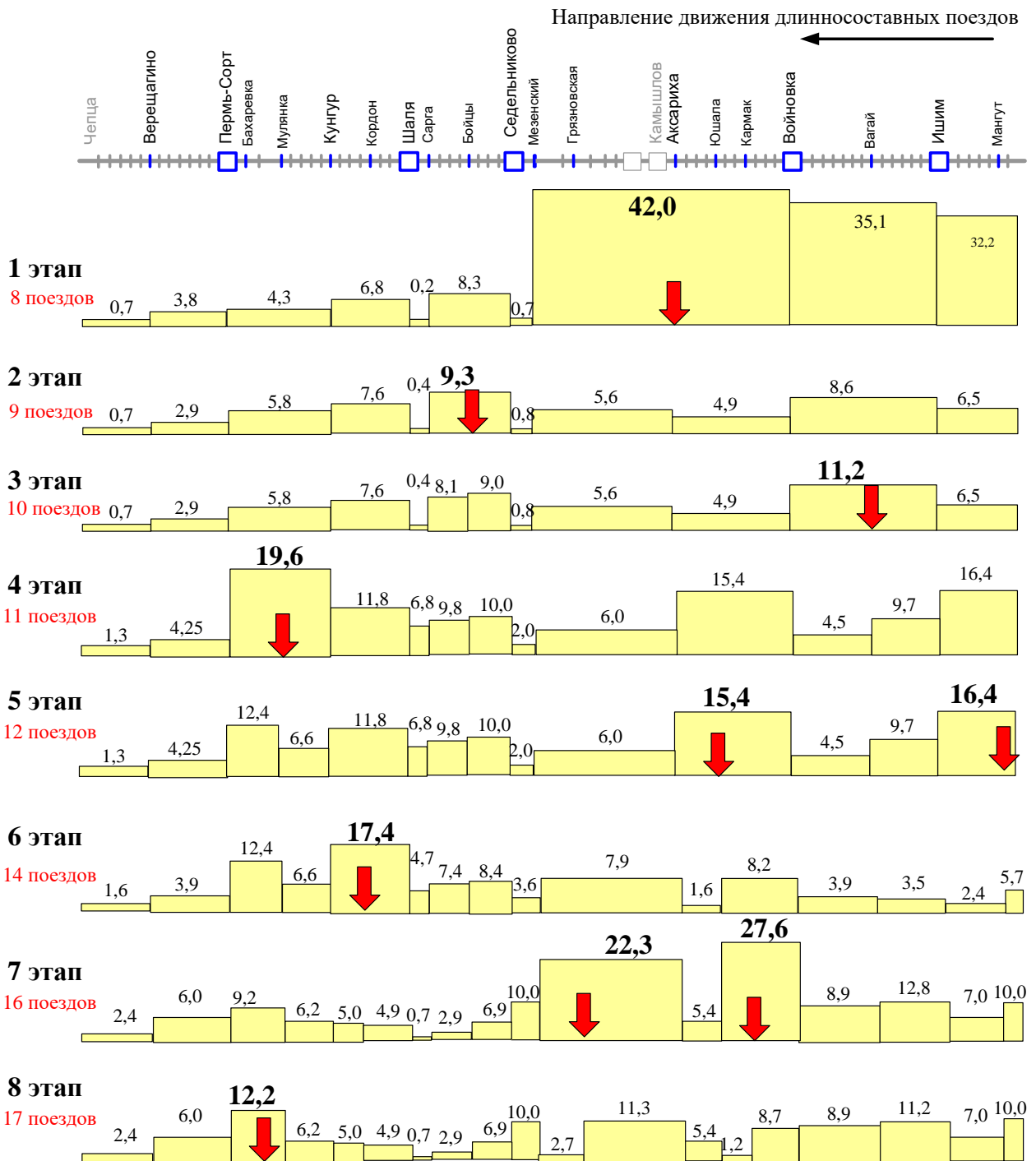


Рисунок 23. Расчет поэтапного развития полигона с использованием имитационного спуска

В главе 7 «Проблема гармоничного структурно-функционального построения железнодорожных станций» рассматриваются существующие и предлагаемые подходы по определению параметров парков и горловин, обеспечивающих их гармоничное взаимодействие. До последнего времени не было найдено способа адекватного представления горловины для расчета ее пропускной способности. Использовался предельно упрощенный подход – горловину представляет наиболее загруженная стрелка. И поток при ее 100%-ной загрузке

означает пропускную способность горловины. Не было убедительного аппарата проверки, поэтому это положение, логически достаточно правдоподобное, вошло в утвержденные инструкции. Моделирование показало, что подход неправомерен (см. рис. 4). Горловины нужно рассматривать в виде множества структурных каналов (рисунок 24). Каналов столько, сколько возможно в горловине параллельных передвижений.

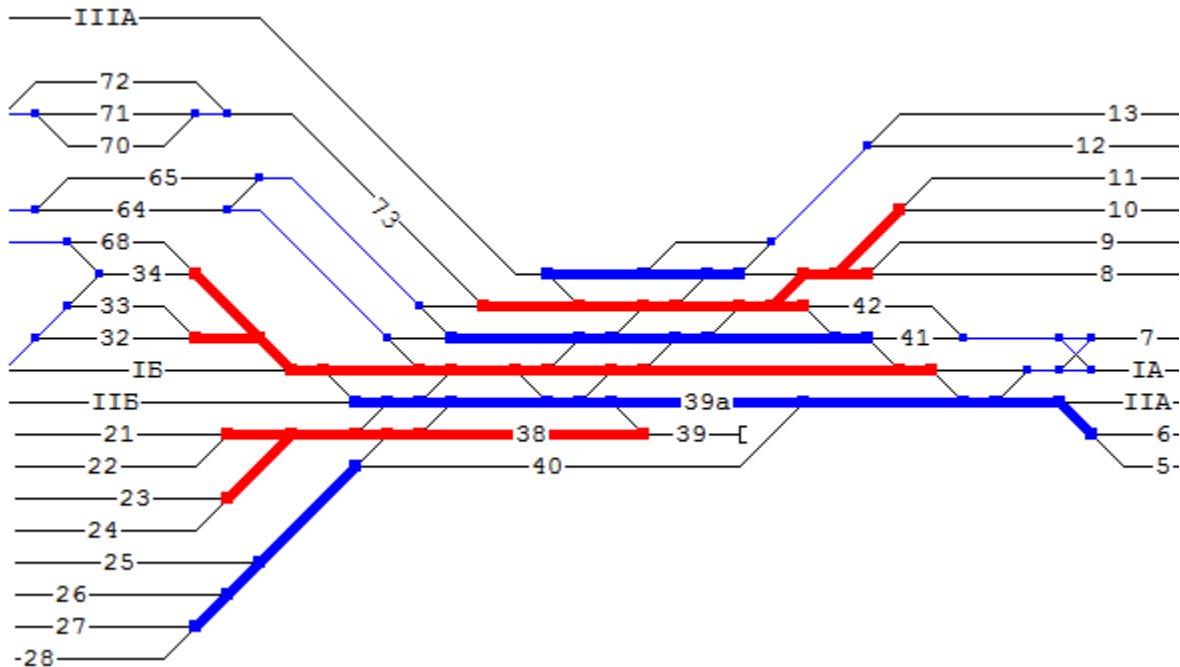


Рисунок 24. Структурные каналы в горловине станции

Структурные возможности горловины, в зависимости от используемой технологии, могут быть реализованы в большей или в меньшей степени. Возможные параллельные передвижения при наложенной на структуру технологии будем называть *функциональными каналами*. Маневренность горловины при заданной технологии будет определять *среднее число возможных передвижений за расчетный период*. Тогда можно ввести количественные параметры, которые позволят сравнивать и горловины, и уровень их взаимодействия с парками. Обозначим:

- n – число стрелок в горловине,
- m – число путей в парке,
- k – число структурных каналов,
- k^* – число функциональных каналов.

Структурирование горловины позволяет сформулировать содержательно оправданные предположения, которые, однако, необходимо потом доказать проведением многих имитационных экспериментов.

1. Если парк является генератором потока, то естественно предположить, что поток может быть тем больше, чем больше путей в парке.

2. Чем больше структурных каналов в горловине, тем больше ее пропускная способность.

3. Чем меньше стрелок приходится на один структурный канал, тем рациональнее спроектирована горловина. Характеризовать это может параметр канало-насыщенность горловины

$$\alpha = \frac{k}{n}, \quad (7.11)$$

При этом для удобства можно пользоваться и обратным соотношением - числом стрелок на один канал,

$$\Delta n = \frac{n}{k}, \quad (7.12)$$

4. Согласованность структуры парка и горловины может характеризовать параметр маршрутная обеспеченность парка

$$\beta = \frac{k}{m}, \quad (7.13)$$

5. Согласованность структуры горловины и наложенной технологии может характеризовать параметр функциональность горловины (чем больше коэффициент γ , тем выше согласованность структуры и технологии на станции):

$$\gamma = \frac{k^*}{k}, \quad (7.14)$$

6. Универсальным критерием положительности структурно-функциональных решений является снижение задержек на одну операцию.

После проведения масштабных исследований структурных и функциональных зависимостей, можно задать нормативы (или допустимые пределы) для сформулированных выше параметров горловин и их взаимодействия с парками. Это позволит оценить качество проекта станции количественно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложено научное решение важной народнохозяйственной проблемы – создание методологии эффективного распределения инвестиций при развитии транспортной инфраструктуры. Разработана технология имитационной экспертизы проектов развития больших полигонов. Определены основные стратегии оптимизации полигонов. В том числе получены *следующие результаты*:

а) выполнен анализ принципиальных подходов, реализованных и закрепленных в существующих инструкциях по расчету станций, участков и полигонов. Выявлены некорректности и предложены новые принципиальные основы;

б) критической некорректностью является представление транспортных объектов как последовательности некоторых каналов обслуживания. Исходя из этого определяется и пропускная способность всей цепочки и «узкое место». Показано, что канал нельзя рассматривать изолированно. Перед ним всегда находится связанный с ним технологически бункер (резервные пути). Бункер играет кроме пассивной роли (места ожидания) еще и активную роль – преобразователя потока. Поток в нем преобразуется из случайного в управляемый. Тем самым бункер определяет уровень возможного полезного использования канала;

в) минимальным расчетным элементом на станциях и участках следует считать канал-бункер или *дуплекс*. И станция в целом, и участок являются совокупными дуплексами. В реальности на примерно половине промежуточных станций стоят поезда по неприему техническими. Именно пропускная способность дуплексов определяет пропускную способность полигонов;

г) при инфраструктурном развитии железнодорожных направлений следует стремиться строить, так называемый, «гармонически построенный полигон» – то есть полигон, в котором пропускная способность всех дуплексов одинакова;

д) сформулированы принципы эффективного взаимодействия парков и горловин. На этой основе предложен ряд показателей, которые как нормативы определяют уровень соответствия структуры и технологии на станциях. Это создает основу для гармоничного структурно-технологического построения железнодорожных станций;

е) разработана технология трехэтапного расчета полигонов с использованием моделирования. На первом этапе методом макроструктурного моделирования определяются проблемные станции, на втором – оцениваются эскизные проекты их развития по нормативам структурно-функциональной гармонии, на третьем – осуществляется имитационная экспертиза проектов на подробных моделях.

ж) основные стратегии оптимизации полигонов осуществляются по критериям – «максимум пропускной способности», «максимальная скорость потоков», «минимум инвестиций при заданной скорости потока»;

з) разработана технология имитационного спуска для эффективной реализации процедур оптимизации по этим критериям. Показано, что понятие так называемого «узкого места» будет разным в различных стратегиях.

Предложенная методология исследования, расчета и оптимизации полигонов позволит более корректно оценивать масштабные проекты развития транспортной инфраструктуры, что позволит существенно снизить неоправданные инвестиционные потери.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

В изданиях, включенных в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Колокольников В.С. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов / Козлов П.А., Пермикин В.Ю., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2013. – № 2 (37). – С. 3–5.

2. Колокольников В.С. Влияние отказов технических средств на выполнение графика движения поездов / Ковалев И.А., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2014. – № 2 (41). – С. 54–57.

3. Колокольников В.С. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с использованием аппарата имитационного моделирования / Козлов П.А., Осокин О.В., Колокольников В.С. // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 6. – С. 12–16.

4. Колокольников В.С. Макроструктурный подход в исследовании железнодорожных станций / Козлов П.А., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2017. – № 2 (53). – С. 3–7.

5. Колокольников В.С. Модель проверяет скорость / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А., Тимухина Е.Н. // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 3. – С. 42–44.

6. Колокольников В.С. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А. // Транспорт Урала. – 2016. – № 4 (51). – С. 3–7.

7. Колокольников В.С. О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями / Козлов П.А., Вакуленко С.П., Колокольников В.С. // Наука и техника транспорта. – 2019. – №2. – С. 70–76.

8. Колокольников В.С. О результирующей пропускной способности последовательно расположенных устройств / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (33). – С. 53–61.

9. Колокольников В.С. О согласованном структурно-функциональном построении железнодорожных станций / Козлов П.А., Колокольников В.С. // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 3. – С. 106–110.

10. Колокольников В.С. О технологии расчета железнодорожных станций / Козлов П.А., Тушин Н.А., Колокольников В.С. // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 6. – С. 42–46.

11. Колокольников В.С. Об имитационном моделировании и имитационных системах // Козлов П.А., Колокольников В.С., Копылова Е.В. // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 3–6.

12. Колокольников В.С. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / Козлов П.А., Тушин Н.А., Колокольников В.С., Осокин О.В. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (41). – С. 60–69.

13. Колокольников В.С. Обоснование эффективности увеличения ходовых скоростей грузовых поездов / Колокольников В.С., Тунева Т.С. // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 61–65.
14. Колокольников В.С. Определение параметров парков и горловин станций с учетом их взаимодействия / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А. // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 3–7.
15. Колокольников В.С. Определение рациональной инфраструктуры железнодорожных станций для пропуска тяжеловесных поездов / Колокольников В.С., Тимухина Е.Н., Кащеева Н.В. // Транспорт: наука, техника и управление. – 2017. – № 7. – С. 32–36.
16. Колокольников В.С. Оптимизация оборота локомотивов при заданных поездопотоках / Козлов П.А., Колокольников В.С., Вакуленко С.П. // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 10. – С. 34–37.
17. Колокольников В.С. Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Колокольников В.С., Тимухина Е.Н., Кощеев А.А., Кащеева Н.В. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (49). – С. 26–33.
18. Колокольников В.С. Проблема организации единой транспортной системы / Козлов П.А., Вакуленко С.П., Колокольников В.С. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 3 (67). – С. 96–101.
19. Колокольников В.С. Расчет и оптимизация полигонов железнодорожного транспорта / Козлов П.А., Колокольников В.С. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (71). – С. 113–120.
20. Колокольников В.С. Расчет параметров гармонически построенной сети железных дорог / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А. // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 12. – С. 18–21.
21. Колокольников В.С. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей / Козлов П.А., Сорокин В.И., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 3–8.
22. Колокольников В.С. Согласованная оптимизация составных технологических процессов / Козлов П.А., Колокольников В.С., Вакуленко С.П. // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 3–6.
23. Колокольников В.С. Структурно-функциональная оптимизация больших полигонов железнодорожного транспорта / Козлов П.А., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2018. – № 3 (58). – С. 3–7.
24. Колокольников В.С. Структурно-функциональное исследование железнодорожных станций / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 4 (64). – С. 86–91.

25. Колокольников В.С. Теоретические аспекты взаимодействия потока и элементов структуры в транспортных системах / Козлов П.А., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 3–7.

26. Колокольников В.С. Теоретические основы гибкого взаимодействия станций в узле / Козлов П.А., Колокольников В.С. // Транспорт Урала. – 2013. – № 2 (37). – С. 28–31.

27. Колокольников В.С. Технология макро моделирования полигонов / Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. // Транспорт Урала. – 2019. – № 3 (62). – С. 48–51.

в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science:

28. Колокольников В.С. Modeling of Large Railway Polygons (Моделирование больших полигонов железнодорожного транспорта) / Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А., Тимухина Е.Н. // MATEC Web of Conferences. 10th International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. – 2018. – №216.

29. Колокольников В.С. Construction of efficient railway operating domains on the basis of a simulation examination (Построение эффективных полигонов железнодорожного транспорта на основе имитационной экспертизы) // Бородин А.Ф., Козлов П.А., Колокольников В.С., Осокин О.В. // Advances in Intelligent Systems and Computing (VII International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2019, Volume 2). – 2020. – №1116.

в журналах, научных сборниках и других изданиях:

30. Колокольников В.С. Активизация динамических резервов в транспортном узле за счет гибкого взаимодействия / Пермикин В.Ю., Колокольников В.С. // Инновационный транспорт. – 2013. – № 2 (8). – С. 67–70.

31. Колокольников В.С. Применение структурно-технологического исследования при планировании развития транспортных систем промышленных предприятий / Ковалев И.А., Колокольников В.С. // Инновационный транспорт. – 2015. – № 4 (18). – С. 62–66.

32. Колокольников В.С. Сравнение современных методов расчета железнодорожных станций / Ковалев И.А., Колокольников В.С. // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 80–82.

33. Колокольников В.С. Развитие железнодорожной инфраструктуры портов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 3 (20). – С. 44–48.

34. Колокольников В.С. Автоматизированное моделирование, исследование железнодорожных станций // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 81 с.

35. Колокольников В.С. Имитационная экспертиза проектов развития сортировочных станций / Ковалев И.А., Колокольников В.С. // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: Сб. статей XIV Междун. научн.-технич. конф. – Пенза: РИО ПГСХА, 2010. – С. 118–121.

36. Колокольников В.С. Оценка возможности развития путевой инфраструктуры промышленных предприятий // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Сб. ст. Десятой междунар. науч.-практ. конф. / под ред. проф. Щурина К.В. – Оренбург: Оренбург. гос. ун-т.; ООО «Руссервис», 2011. – С. 164–166.

37. Колокольников В.С. Повышение эффективности работы промышленных транспортных систем с использованием контактного графика / Ковалев И.А., Колокольников В.С. // Общие вопросы транспорта. Моделирование и оптимизация в логистических транспортных системах: Сб. науч. трудов // под научн. ред. Е.Н. Тимухиной, к.т.н. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. – С. 144–148.

38. Колокольников В.С. Построение имитационных моделей в автоматизированных системах // Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы I Междун. научн.-технич. конф. – Курган, 2013. – С. 333–336.

39. Колокольников В.С. Применение имитационного моделирования для исследования проектов развития железнодорожных станций и линий / Козлов П.А., Колокольников В.С., Осокин О.В. // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление: сб. научных трудов II международной научн.-практ. конф. – Ростов-на-Дону. – 2018. – С. 219–227.

40. Колокольников В.С. Современные методы расчета систем железнодорожного транспорта / Козлов П.А., Пермикин В.Ю., Колокольников В.С. // Механика и трибология транспортных систем: сборник докладов международной научной конференции, Ростов-на-Дону. – 2016. – С. 30–36.

41. Колокольников В.С. Структура современной имитационной системы / Козлов П.А., Осокин О.В., Колокольников В.С. // Труды ОАО «НИИАС». Сборник научных трудов. – 2014. – Выпуск 10. – С. 102–111.

42. Колокольников В.С. Структурно-функциональное исследование систем железнодорожного транспорта / Козлов П.А., Пермикин В.Ю., Колокольников В.С. // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2016): Сб. статей V научн.-технич. конф. с междун. участием – Москва: ОАО «НИИАС», 2016. – С. 240–243.

Колокольников Виталий Сергеевич

Структурно-функциональная оптимизация полигонов на сети железных дорог

05.22.08 – Управление процессами перевозок (технические науки)

Подписано в печать 21.06.2021

Формат 60 x 84 1/16 Объем 2,1 усл. п. л.

Заказ 23 Тираж 120 экз.

УрГУПС

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66