

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский университет транспорта (МИИТ)»
РУТ(МИИТ)

На правах рукописи

ЧЖО МИН АУНГ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В УСЛОВИЯХ
РАЗВИВАЮЩИХСЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (транспорт)

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Сидоренко Валентина Геннадьевна

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ современных подходов к планированию движения транспортных средств.....	11
1.1 Перспективы развития транспортной инфраструктуры г. Янгона (Республика Мьянма)	11
1.2 Опыт автоматизации планирования движения поездов.....	13
1.3 Опыт использования графовых моделей для решения задач автоматизации управления транспортными системами.....	19
1.4 Опыт использования генетических алгоритмов для решения задач автоматизации управления транспортными системами	21
1.5 Постановка задачи научного исследования.....	24
Основные выводы и результаты по главе.....	27
2. Методика автоматизированного планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов	28
2.1 Модели процессов, связанных с построением ПГД.....	28
2.2 Выбор методологии автоматизации планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов. Выбор методологии построения АСП ПГД ППМ.....	39
2.2.1 Выбор схемы, применяемой для создания АСП ПГД ППМ	39
2.2.2 Создание Представления АСП ПГД ППМ.....	42
Основные выводы и результаты по главе.....	48
3. Определение порядка заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов на линии.....	49
3.1 Постановка задачи	49
3.2 Подготовка исходных данных.....	52
3.3 Удаление из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам.....	60
3.4 Уплотнение графа и построение дерева.....	62
3.4.1 Общие положения	62
3.4.2 Построение дерева	67
3.4.3 Уплотнение графа	76
3.4.4 Алгоритм разворачивания «уплотненного» графа в дерево.....	81

3.4.5 Сравнение результатов уплотнения графа и построения дерева	83
3.4.6 Использование матрицы смежности графа для уплотнения графа	85
Основные выводы и результаты по главе	90
4. построение прототипа ГО.....	91
4.1 Постановка задачи	91
4.2 Построение прототипа ГО с использованием генетического алгоритма ...	99
4.2.1 Общая схема генетического алгоритма	99
4.2.2 Определение размера первичной популяции	104
4.2.3 Кроссинговер	106
4.2.4 Мутация.....	113
4.2.5 Условия окончания работы генетического алгоритма.....	116
4.3 Результаты построения прототипа ГО	116
Основные выводы и результаты по главе	127
Заключение.....	128
Список литературы.....	130
Приложение А.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. До 2006 года столицей республики Союз Мьянма был Янгон – самый густонаселенный город страны. Метро лучше других видов транспорта обеспечивает качество пассажирских перевозок в рамках существующего города и в дальней перспективе.

В настоящее время Москва переживает значительный рывок в развитии метрополитена, который осуществляет перевозку 6,498 млн. пассажиров в день. За последние два года в Москве сдана в эксплуатацию 21 новая станция метрополитена, проложено 50,1 км подземных магистралей, что составляет 10,57 % от числа станций и 15,22 % от протяженности подземных линий на начало 2016 года с начала эксплуатации метрополитена в 1935 г.

В связи с этим актуальной является задача автоматизация планирования перевозочного процесса в условиях развивающихся метрополитенов дружеских стран – России и Республики Мьянма. Одним из аспектов решения задачи автоматизации является выбор методики построения математического и программного обеспечения средств автоматизации с учетом изменяющихся во времени требований пользователей и расширяющегося множества объектов автоматизации. Это определяет актуальность проводимых исследований.

Степень разработанности темы исследования

В мире накоплен значительный опыт автоматизации планирования и управления движением поездов метрополитена. В работах зарубежных авторов проводится общий анализ практических результатов применения разнообразного математического аппарата к решению таких задач. Примером может служить работа Тернер С., Старр А., Тивари А., Блэктоп К. Большой вклад в автоматизацию работы метрополитенов внесли ученые России. Авторами работ, связанных с алгоритмами централизованного управления движением поездов метрополитена, являются Балакина Е.П., Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф.,

Воробьев П.Ю., Ерофеев Е.В., Ершов А.В., Козлов В.П., Логинова Л.Н., Сеславин А.И., Сидоренко В.Г. и др. Работы Балакиной Е.П., Баранова Л.А., Годяева А.И., Ерофеева Е.В., Максимова В.М., Моисеева А.А., Мелешина И.С. и др. посвящены разработке и исследованию алгоритмов поездных устройств автоведения поездов метрополитена. Вопросами планирования движения поездов метрополитена занимались в первую очередь Баранов Л.А., Василенко М.Н., Дегтярев Д.П., Жербина А.И., Новикова М.В., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г., Тишкин Е.М., Феофилов А.Н. и др. Как правило, эти работы затрагивают и смежные области знания, а именно взаимодействие систем управления и обеспечения безопасности движения, моделирование функционирования систем метрополитена; создание автоматизированных средств обучения персонала, связанного с управления движением поездов метрополитена.

Объектом исследования в данной работе является автоматизация и управление технологическими процессами в условиях развивающихся метрополитенов.

В качестве **предмета исследования** рассматриваются алгоритмы планирования движения поездов метрополитена.

Целью диссертации является совершенствование методики автоматизированного планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов при учёте возможности расширения множеств объектов линии метрополитена.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ современного состояния вопроса и классификация задач планирования перевозочного процесса.

2. Анализ современных методологий проектирования программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

3. Создание ранее не автоматизированных процедур, входящих в состав процесса построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена (ПГД ППМ), а именно:

- процедуры определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, результаты которой используют процессы ухода составов на ночную расстановку и выхода составов из ночной расстановки;

- процедуры автоматического построения графика оборота (ГО) электроподвижного состава (ЭПС) метрополитена, результаты которой используют процессы равномерного снятия составов после часа «пик» и организации связи планового графика движения (ПГД) и ГО.

4. Реализация программных средств и информационного обеспечения автоматизированной системы построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена (АСП ПГД ППМ) с использованием разработанных принципов построения системы, формализаций, алгоритмов и моделей.

5. Проведение имитационных экспериментов с целью анализа качества функционирования разработанного математического и программного обеспечения.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт), пункт 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)».

Научная новизна работы состоит в том, что:

- Разработаны модели процессов, входящих в жизненный цикл ПГД и ГО, позволившие выполнить декомпозицию задач автоматизированного планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов, отличающиеся от известных более высокой степенью обобщения и интегрированным подходом к

решению всего комплекса задач, связанных с проектированием и эксплуатацией ПГД и ГО.

- Созданы алгоритмы топологической сортировки вершин графа, отличающиеся от известных учетом ограничений, возникающих при решении задачи определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов.

- Показано влияние интеграции разработанных процедур в автоматизированное построение ПГД на расширение множества вариантов реализации переходных процессов ПГД.

- Формализованы способы кроссинговера, отличающиеся от известных учетом особенностей аллелей, используемых при организации работы генетического алгоритма (ГА) для решения задачи построения ГО.

- Сформулированы критерии оптимальности построения ГО, учитывающие особенности распределения ресурсов строящейся линии метрополитена.

- Показано влияние параметров ГА на решение задачи построения ГО.

Теоретическая и практическая значимость состоит в том, что:

- Разработанные процедуры определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов позволяют рассматривать все множество вариантов реализации переходных процессов ухода составов на ночную расстановку и выхода составов из ночной расстановки в ходе автоматизированного построения ПГД поездов на линии метрополитена.

- Алгоритмы автоматического построения ГО ЭПС позволяют расширить множество рассматриваемых вариантов реализации переходных процессов равномерного снятия составов после часа «пик» и организации связи ПГД и ГО.

- Разработанная на базе схемы *Model-View-Controller* (MVC, Модель-Представление-Контроллер) методика автоматизированного планирования движения поездов позволяет эффективно решать расширяющиеся множества возникающих в ходе строительства метрополитена задач пользователей средств автоматизации.

- Разработанные математическое, информационное и программное обеспечение являются составной частью АСП ПГД ППМ.

- Разработанные и включенные в состав программного обеспечения АСП ПГД ППМ компоненты, реализующие связь графических объектов, визуализирующих объекты линии, с самими объектами, позволяют реализовать эффективное решение задач, связанных с ночной расстановкой и организацией маневровых перемещений составов, а также наглядно представлять процесс синтеза ПГД и ГО.

- Заложенная в основу создания разработанной автором системы поддержки принятия решения (СППР) возможность ее адаптации к решению различных задач может служить основой для численного решения оптимизационных задач планирования движения пассажирских поездов метрополитена генетическими алгоритмами (ГА).

Методы исследований. Результаты диссертационной работы получены на основе использования системного анализа, теории управления, теории систем искусственного интеллекта, теории расписаний, теории графов, метода динамического программирования и методов имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- Методика проектирования, технические разработки, модели и структурные решения человекомашинных систем, предназначенных для автоматизации построения ПГД.

- Модели процесса сбора и анализа данных ПГД и ГО и подпроцессов, входящих в его состав.

- Алгоритмы и результаты решения задачи автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов с использованием описания графов в графической и матричной формах.

- Способы описания фитнес-функции, хромосомы, кроссинговера, учитывающие особенности аллелей, используемых при организации работы генетического алгоритма для решения задачи построения ГО ЭПС при

выполнении и невыполнении необходимого условия построения ГО, и способ определения размера первичной популяции и необходимости мутаций на основе заданной вероятности того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе.

– Результаты имитационных экспериментов, выполненных с целью анализа качества функционирования разработанного математического и программного обеспечения.

Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, опирается на результаты проверки адекватности использованной модели и обусловлена корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, удовлетворительной сходимостью результатов работы АСП ПГД ППМ с данными, полученными в результате работы опытных инженеров–графистов Московского метрополитена без использования данной системы, получением известных результатов, как частного случая результатов данной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Управление и защита информации» («УиЗИ») (РУТ(МИИТ) 2016-2018 г.г.), на четырёх научно-практических конференциях «Неделя Науки» (РУТ(МИИТ), 2014-2018 г.г.), на трёх научно-практических конференциях «Безопасность Движения Поездов» (РУТ(МИИТ), 2015-2017 г.г.), на двух международных конференциях «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ИПУ РАН 2016-2017 г.г.), на двух научно-технических конференциях с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (2016-2017 г.) и на международной конференции «Fourth International Conference on Railways Technology - RAILWAYS 2018» (Barcelona (Spain), 2018 г.).

Реализация результатов работы. Разработанные сценарии автоматизированного построения ГО являются составной частью АСП ПГД ППМ, внедренной на Московском метрополитене, и используются при построении процессов ПГД для линий Московского метрополитена. Результаты диссертации

используются в учебном процессе кафедры «УиЗИ» РУТ(МИИТ). Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 22 работы, 5 из них – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 1 приложения, списка литературы, включающего 162 наименований, изложена на 152 страницах и поясняется 50 рисунками и 9 таблицами.

В первой главе систематизированы работы Российских и зарубежных авторов, посвященных вопросам автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитенах.

Во второй главе разработаны и модели процессов, входящих в жизненный цикл ПГД и ГО и структура Представления для системы «АРМ Графиста–2.0».

В третьей главе рассмотрены вопросы определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, уход на которую является ключевым процессом построения ПГД, разработаны соответствующие алгоритмы и проанализированы результаты ее исполнения.

В четвертой главе представлена процедура построения прототипа ГО и результаты ее исполнения.

В приложении приведены акты о внедрении.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ПЛАНИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.

1.1 Перспективы развития транспортной инфраструктуры г. Янгона (Республика Мьянма)

Республика Мьянма – государство в Юго-Восточной Азии, расположенное в западной части полуострова Индокитай и граничащее с Индией (1463 км) и Бангладеш (193 км) на западе, с Китаем (2185 км) на северо-востоке, с Лаосом (235 км) на востоке и Таиландом (1800 км) на юго-востоке. С юга и юго-запада её берега омываются водами Бенгальского залива и залива Моутама (Мартабан), а также Андаманского моря. Площадь страны, включая прилегающие острова, составляет 678 тыс. км², длина береговой линии – 1930 км. В Мьянме живет примерно 55 млн человек. В 2006 году столица была перенесена из Янгона в новый город Нейпидо, примерно в 200 км севернее, но Янгон остается самым густонаселенным городом.

Янгон – город огромный и рассредоточенный, по сравнению с другими крупными городами Юго-Восточной Азии, не обладающий хорошей инфраструктурой. Город известен своей архитектурой XIX века. Янгон является коммерческим центром Мьянмы. На его территории находится наибольшее количество университетов и медицинских учреждений по сравнению с любым другим городом в стране. В настоящее время численность населения Янгона насчитывает около 6 миллионов человек и стремительно растет. Темпы роста населения в Янгоне опережают темпы роста во всей стране и в настоящее время составляют около 3% в год. Транспортные проблемы в Янгоне связаны с трудной доступностью некоторых его районов.

Большая часть прямых иностранных инвестиций Мьянмы поступила в III-IV кварталах 2012 года. Столь масштабные инвестиции в инфраструктуру города необходимы, поскольку население Янгона, по прогнозам, удвоится к 2040 году.

В конце 2013 года Японское агентство международного сотрудничества (*JICA*) инвестировало в модернизацию окружной/кольцевой железной дороги Янгона и предложило построить две подземных железнодорожных линии, а также легкое метро для улучшения общей транспортной ситуации в городе. На Рисунке 1.1 представлена планируемая карта метро Янгона. Японское правительство через *JICA* нацелено выполнить модернизацию инфраструктуры, а также в рамках проекта обновить парк подвижного состава и систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

В перспективе, Янгон столкнётся с гораздо более серьезной проблемой и, вероятно, окружная/кольцевая железная дорога, обновлённая до международных стандартов, не справится с пассажиропотоком при населении более чем 10 миллионов человек.

Рассматриваются три варианта развития скоростного транспорта:

- легкорельсовый транспорт (*LRT*), такой, как трамвай или монорельс;
- метрополитен (*MRT*);
- скоростной автобусный транспорт (*BRT*).

JICA готово развивать трамвайную линию от «Кееминдаинг» до «Странд Отель». После утверждения и реализации этого проекта они планируют сооружение небольшой трамвайной кольцевой линии. ЛРТ легче и дешевле, чем метрополитен, но одного этого вида транспорта не достаточно для нужд растущего населения.

Известны две основные причины, оправдывающие строительство метро в Янгоне. Во-первых, метро легче в развитии в рамках существующего города и в дальней перспективе. Населению Янгона необходимо предоставить возможность быстрого доступа из исторической части города на периферию. В этой ситуации железнодорожные системы куда эффективнее, нежели наземное уличное сообщение (автобус/троллейбус). Опыт показывает, что при огромном населении мегаполиса создание одной основной магистрали городского наземного скоростного рельсового транспорта позволяет облегчить транспортную проблему

лишь на время. Примером служит создание «системной шины» Джакарты [1]. Во-вторых, развитие метро привлекает частных инвесторов и содействует развитию объектов недвижимости вокруг станций [2].

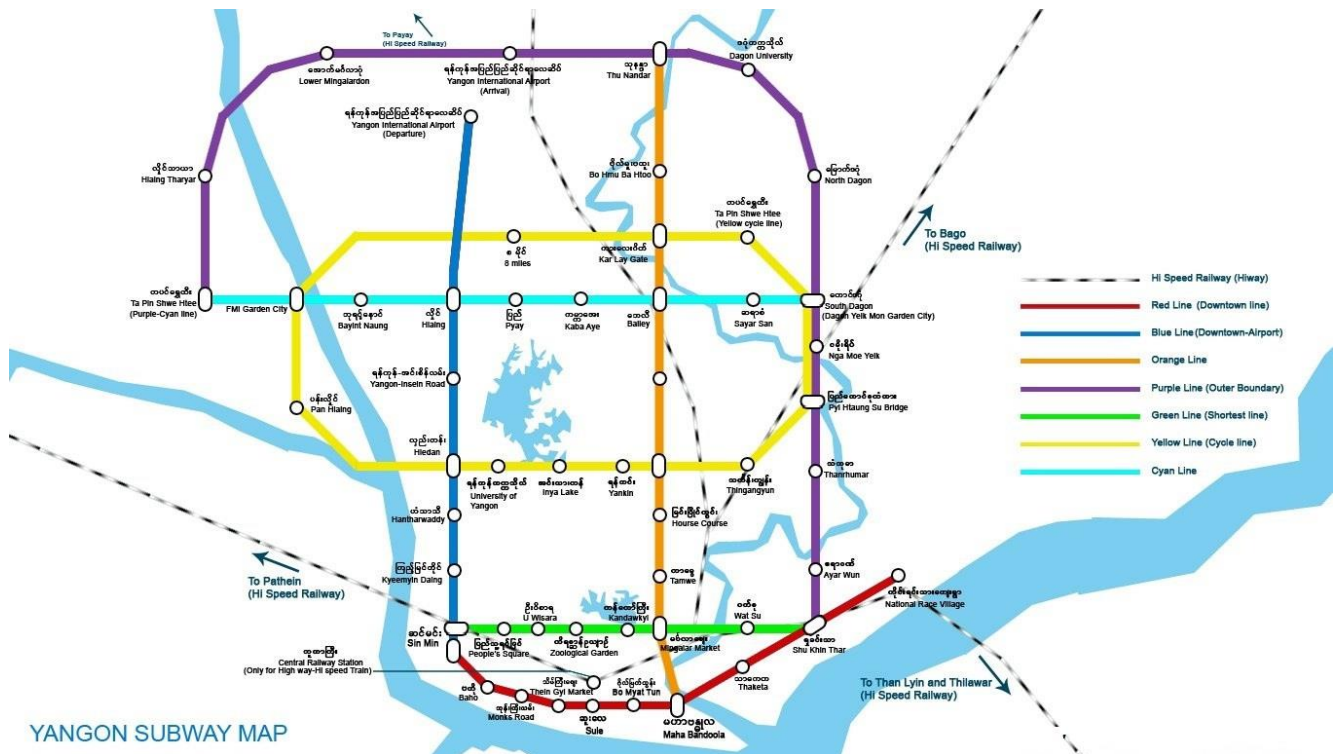


Рисунок 1.1 – Планируемая карта метро Янгона

1.2 Опыт автоматизации планирования движения поездов

Существует множество научных публикаций, посвященных применению интеллектуальных вычислительных систем при планировании перевозочного процесса на железных дорогах и метрополитенах.

В статье [3] выполнена классификация задач планирования перевозочного процесса на железных дорогах и метрополитенах, которые подразделяются на задачи

- планирования движения поездов,
- планирования технического обслуживания подвижного состава,
- планирования технического обслуживания инфраструктуры,

– взаимодействия с системами управления движением поездов и интервального регулирования движения поездов.

В статье [3] сделан акцент на такой особенности железнодорожного транспорта, как строгая предопределенность маршрута движения поезда проложенным железнодорожным путем.

В проанализированных автором работах рассматриваются различные аспекты планирования движения поездов:

– место системы планирования движения поездов в рамках системы управления перевозочным процессом на железных дорогах, используемой на железных дорогах Европы, в том числе и высокоскоростных, – Европейской системы управления перевозочным процессом на железных дорогах (*ERTMS*) [4] [5] [6] [7];

– применение для решения задачи построения оперативного графика движения современных алгоритмов искусственного интеллекта [8], в частности, генетических алгоритмов [9];

– решение задачи оптимизации планового графика движения поездов [10], в частности методом Роя Частиц [11];

– решение задачи планирования технического обслуживания подвижного состава [12] ;

– применение различных формализаций к решению задачи планирования и управления: языка графического описания/моделирования программного обеспечения *Unified Modeling Language (UML)* и сетей Петри [13] [14], специализированного языка разметки метаданных *RailML*, наследник языка *XML*, используемый для определения железнодорожных терминов [15].

В ходе диссертационного исследования в качестве объектов автоматизации рассматривались не только сами линии метрополитена, связанные с ними объекты и процесс планирования перевозочного процесса, но и способ отображения результатов планирования перевозочного процесса [16].

Одним из аспектов решения задачи автоматизации является выбор методики построения математического и программного обеспечения средств автоматизации с учетом изменяющихся во времени требований пользователей и расширяющегося множества объектов автоматизации.

В 2004 году на ГУП «Московский метрополитен» внедрена разработанная на кафедре «УиЗИ» РУТ(МИИТ) АСП ПГД ППМ («АРМ Графиста»). За время эксплуатации система показала свою эффективность. Она используется для построения ПГД для всех линий Московского метрополитена, которые значительно различаются между собой по своим свойствам, количеству и взаимодействию объектов. Построение ПГД может проводиться с разной степенью использования средств автоматизации. Интерфейс системы претерпел за время эксплуатации значительные изменения в соответствии с требованиями пользователей. В ходе диссертационного исследования автор проанализировал накопленный опыт и предложил новые подходы к созданию автоматизированной системы «АРМ Графиста–2.0» с использованием современных технологий программирования и последних достижений в области компьютерных наук (*Computer Science*). Компьютерные науки – ядро теоретических и практических знаний, которые используют в своей работе специалисты в области вычислительной техники, программирования, информационных систем и технологий [17] [18]. Система «АРМ Графиста–2.0» позволит решать задачи автоматизации планирования движения поездов не только для условий Московского метрополитена, но и других метрополитенов, в том числе и строящихся, к которым относится метрополитен г. Янгона (Республика Мьянма).

Разрабатываемые средства автоматизации относятся к классу систем поддержки принятия решений [19], а, следовательно, с одной стороны включают в свой состав развитую бизнес-логику, а с другой развитые средства визуализации [20]. В данном пункте будут изложены результаты анализа опыта автоматизации планирования движения поездов как в России, так и за рубежом.

При разработке средств автоматизации под бизнес-логикой понимается совокупность правил, принципов, зависимостей поведения объектов предметной

области (области человеческой деятельности, которую система поддерживает) [21]. Разработке бизнес-логики автоматизированного построения ПГД и ГО посвящено множество работ, которые можно систематизировать по разным принципам [22]:

- по предмету исследования (возможный подход к систематизации этих работ представлен на Рисунке 1.2);

- по математическим методам, применяемым к решению поставленных задач. В Таблице 1.1 показано, что для решения задач управления транспортными системами одного класса успешно используются разнообразные методы, и наоборот один и тот же метод может использоваться для решения разных задач.

В данной работе в качестве основных методов исследования выбраны системный анализ, теория систем искусственного интеллекта, теория графов, метод динамического программирования.

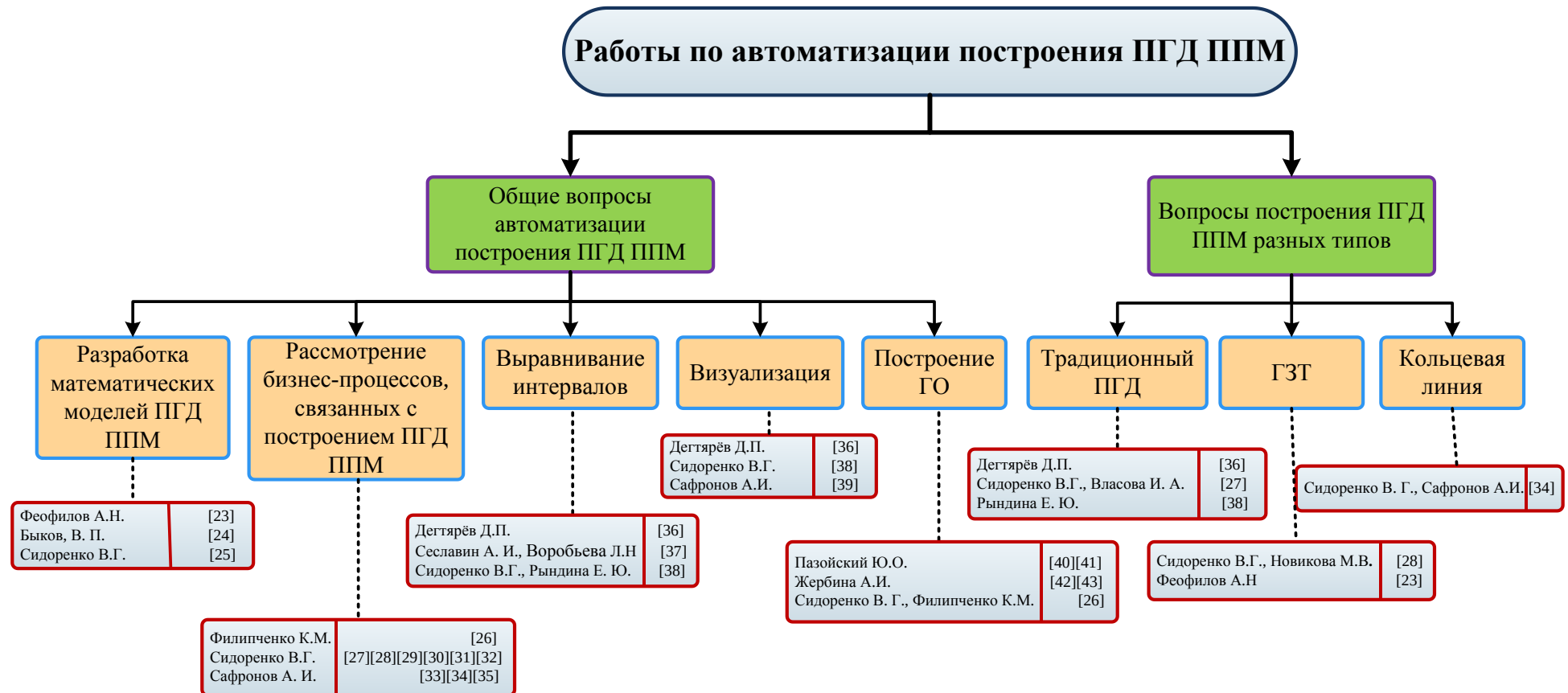


Рисунок 1.2 – Классификация публикаций, посвященных автоматизации построения ПГД и ГО, по предмету исследования

Таблица 1.1 – Методы для решения задач управления транспортными системами

Методы Задачи	Байесовские сети	Экспертная система	Эволюционное вычисление, генетические алгоритмы	Эвристика	Семантический / Онтология	Поисковые алгоритмы	Оптимизация	Теория графов	Методы нечеткого управления	Целочисленное программирование (Теория чисел)	<i>GridLike</i>	Формализованное описание технологических процессов (бизнес- процессов)	Способы программной реализации систем
планирование движения транспортных средств	[45]	[46] [47]	[48] [9] [45]	[49]	[15]	[48] [50]	[48] [51] [52]	[49] [53] [54] [55]	[51] [54]	[56] [57] [58]	[49]	[53] [54]	[51]
планирование технического обслуживания подвижного состава			[11]		[59]		[11] [60]					[61] [62]	[59]
планирование технического обслуживания инфраструктуры	[63]	[64]		[64]	[64]	[50]		[65] [66]				[63]	
планирование работы персонала (<i>Crew Scheduling</i>)		[67]	[45]		[67]		[68]		[65]			[67]	
взаимодействие с системами управления движением поездов и интервального регулирования движения поездов		[67] [69]	[70]	[69]		[70]	[52]				[71]	[72]	[73]
оперативное планирование (<i>Rescheduling</i>)		[46]	[74] [9]	[75] [9]		[8] [75]	[75] [76]		[77]			[78]	[8]
анализ пассажиропотока		[79]	[67]										
взаимодействие с другими транспортными системами		[80] [81]	[12]			[12]	[10] [82] [81]	[83]				[54]	

1.3 Опыт использования графовых моделей для решения задач автоматизации управления транспортными системами

В ходе диссертационного исследования автор широко использует графовые модели, которые применяются для решения широкого круга задач автоматизации управления транспортными системами, например,

- моделирования топологии транспортной системы [84];
- формализованного описания технологических процессов, протекающих в системе [26];
- разработки алгоритмов управления, реализуемых средствами автоматизации [85] [86] [87];
- решения задач оптимального управления [88].

Основой для разработки широкого класса средств автоматизации управления движением поездов метрополитена является комплексная модель линии метрополитена [89]. Она используется

- в тренажере поездного диспетчера линии метрополитена [90] [91];
- автоматизированной системе оперативного диспетчерского управления движением поездов [92] [88];
- автоматизированной системе энергооптимальных тяговых расчетов [93] [94] [95];
- автоматизированной системе построения плановых графиков движения пассажирских поездов [96] [97] [98] [99] [44];
- автоматизированной системе оценки эффективности использования рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена и накопителей энергии [93] [100].

При построении графа, описывающего топологию линии метрополитена, используется несколько видов вершин, соответствующих следующим объектам линии метрополитена:

- тупикам – смежные с одним ребром;

- краям платформы станций – смежные с двумя ребрами;
- изолирующим стыкам между рельсовыми цепями – смежные с двумя ребрами;
- стрелкам – смежные с тремя ребрами.

Связывающие вершины ребра объединяются в пути, описывающие пути реальной линии метрополитена. Построенная графовая модель линии метрополитена позволяет моделировать движение поездов по главным и станционным путям в различных направлениях в соответствии с ПГД или командами поездного диспетчера.

Для описания технологических процессов и алгоритмов управления используется дискретно-событийное моделирование. Распространенными способами такого моделирования являются сети Петри и нотации бизнес-моделирования, которые вместе со схемами алгоритмов являются разновидностью графовых моделей.

В ходе работ, выполненных на кафедре «УиЗИ» РУТ(МИИТ) построены графовые модели следующих процессов:

- реализуемых в тренажере поездного диспетчера линии метрополитена [90];
- протекающих при управлении движением поездов в соответствии с плановым графиком движения или командами поездного диспетчера [92] [101];
- являющихся основой функционирования системы маршрутно-релейной централизации линии метрополитена и систем обеспечения безопасности движения [92] [94] [102].

Выбор той или иной формализации определяется задачами, для решения которых описание процесса используется.

При решении задач управления графовые модели применяются для иллюстрации работы дискретного варианта динамического программирования Беллмана, аналогичных или построенных на его основе методов решения оптимизационных задач. С их использованием в рамках работ по

автоматизации управления движением поездов метрополитена решены следующие задачи:

- выбора энергооптимальных режимов ведения поездов по перегонам метрополитена [93] [94];
- оптимального по быстродействию восстановления движения поездов по плановому графику после ликвидации причин возникновения больших сбоев [93] [100];
- построения рационального по критерию равномерности назначения осмотров сценария технического обслуживания электроподвижного состава [33].

В ходе диссертационного исследования разработаны следующие графовые модели:

- процессов, входящих в жизненный цикл графика оборота электроподвижного состава и планового графика движения пассажирских поездов [29] [103];
- автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов на линии метрополитена.

В данной работе теория графов применена в 3 главе для решения задачи автоматизированного определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов на линии метрополитена.

1.4 Опыт использования генетических алгоритмов для решения задач автоматизации управления транспортными системами

Генетические алгоритмы (ГА) были формализованы Джоном Холландом в 1960-х годах и в дальнейшем разработаны его студентами и коллегами из Мичиганского университета в 1960-х и 1970-х годах [104] [105].

При описании ГА используются определения, заимствованные из генетики [106] [107]. В Таблице 1.2 представлены основные термины [108] [109].

Таблица 1.2 – Основные термины генетического алгоритма

Термин, заимствованный из генетики	Аналогичный технический термин	Определение
Популяция, поколение	совокупность особей (хромосом)	конечное множество особей, рассматриваемое на итерации эволюции
Особь	индивидуум, экземпляр	генотип либо единичная хромосома, если генотип состоит из одной хромосомы
Хромосома	цепь, двоичная последовательность, цепочка или кодовая последовательность. Понятие «хромосомы» и «особи» совпадают, если особь описывается одной хромосомой.	упорядоченные последовательности генов
Ген	свойство, знак или детектор	атомарный элемент генотипа, в частности, хромосомы
Генотип	структура	набор хромосом особи
Локус	место	местоположение определённого гена на генетической карте хромосомы
Аллель	одно из альтернативных состояний гена	форма состояния генов, занимающих одни и те же локусы в хромосомах и обуславливающих фенотипические различия одного и того же признака
Фитнес-функция	целевая функция для особей популяции	мера точности решения или мера удовлетворения решению задачи
Мутация	изменение генотипа	стойкое (то есть такое, которое может быть унаследовано потомками данной клетки или организма) изменение генотипа, происходящее под влиянием внешней или внутренней среды. Мутация изменяет

		одно или несколько значений генов в хромосоме
Кроссинговер	обмен генетическим материалом между хромосомами	основной генетический оператор, за счет которого производится обмен генетическим материалом между особями, моделирует процесс скрещивания особей
Эволюция	процесс	Процесс изменения популяция до момента выполнения критерия остановки алгоритма

Вычислительные системы, основанные на теоретических иммунологических и генетических механизмах, в настоящее время широко применяются для решения разнообразных научных и технических задач [110]. В частности, ГА [111] нашли широкое применения для решения задач автоматизации управления транспортными системами, например, для:

- логистической организации городских пассажирских перевозок [112];
- организации контейнерных перевозок [113];
- управления морским транспортом [113];
- решения транспортной задачи [114], [115];
- решения задачи планирования проектных работ при создании средств автоматизации [116];
- решения задачи тестирования и повышения контролепригодности дискретных устройств [117] [118];
- поиска максимума функции, оценки регрессионных и нелинейных статистических моделей [119];
- решения задач визуализации и раскраски графов [120] [121].

В данной работе генетический алгоритм применен в 4 главе для решения задачи автоматизированного построения графика оборота электроподвижного состава метрополитена.

1.5 Постановка задачи научного исследования

Создание систем поддержки принятия решения, к которым относятся средства автоматизированного построения ПГД ППМ, предполагает разработку развитого математического обеспечения, которое определяет бизнес-логику системы, и соответствующего программного обеспечения. В связи с этим актуальным является построение моделей автоматизируемых технологических процессов или бизнес-процессов, которые в дальнейшем будем называть просто процессами, в качестве основы для реализации следующих этапов разработки средств автоматизации. Это является первым направлением данного диссертационного исследования.

Реализация процесса ухода составов на ночную расстановку наряду с выполнением заданной в виде функции времени парности движения в течение всего времени движения пассажирских поездов и реализацией ГО является целью управления, на достижение которой направлено построение ПГД. Соответствующий сценарий построения ПГД должен учитывать информацию о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов. В основу рекуррентной процедуры автоматизированного построения ПГД положен метод полного перебора вариантов построения ПГД. Учет всех возможных вариантов выхода из ночной расстановки в начале движения и ухода на ночную расстановку в конце движения позволяет увеличить число рассматриваемых вариантов построения ПГД, повысить вероятность нахождения решением поставленной задачи после рассмотрения меньшего числа вариантов, и повысить качество ПГД [96]. В связи с этим актуальным является автоматическое определение последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, которая не была решена ранее. Раньше эта задача не была решена, поэтому в данном исследовании она является одним из направлений научного исследования.

Планированию технического обслуживания транспортных средств (ТС), в частности построению ГО ЭПС метрополитена, посвящено большое число работ.

В работе [122] эта задача рассматривается как классическая задача о назначениях.

Существует возможность рассматривать задача построения ГО ЭПС метрополитена как задачу о назначениях с изменяющейся во времени матрицей стоимостей [123] [124] [125].

В работе [11] рассматривается задача организации эксплуатации и технического обслуживания ЭПС железных дорог при наличии жестких временных ограничений в условиях открытого рынка – при наличии нескольких конкурирующих компаний, желающих участвовать в решении этой задачи.

Работы [59] [126] посвящены мониторингу технического обслуживания, ремонта и эксплуатации высокоскоростных поездов, использующему информацию, поступающую от *RFID (Radio Frequency Identification)* датчиков, и основывающемуся на обработке событий и семантики для оценки эффективности анализируемой деятельности.

В работе [53] выполнена строгая формализация задачи построения планирования технического обслуживания электроподвижного состава (ЭПС) метрополитена, построения графика оборота ЭПС (ГО), и приведено её решение с использованием методов теории графов [127] [128] и принципа оптимальности Беллмана [129]. Разработанный в статье метод решения задачи дает возможность получить всё множество допустимых назначений обслуживаний и выбрать то, которое с одной стороны будет соответствовать плановому графику движения поездов метрополитена (ПГД), а с другой – минимально отличаться от оптимального по выбранному критерию, что имеет большое практическое значение. Оценка сверху мощности множества полученных вариантов построения ГО имеет порядок 10^9 [53]. Их перебор требует значительных затрат времени. Поэтому актуальной является задача

сокращения времени, затрачиваемого на построение прототипа ГО. Эта задача приобретает особую актуальность в связи с тем, что в процессе согласования ПГД и ГО может возникнуть задача неоднократной модификации прототипа ГО с учетом изменения исходных данных. В связи с этим ещё одним направлением выполненных автором исследований было исследование возможности применения ГА для решения этой задачи с целью сокращения времени её решения [130] [111].

Основные выводы и результаты по главе

1. Проведённый анализ современного состояния вопроса показал актуальность выполнения сформулированной цели диссертационного исследования.

2. Подробная классификация работ, посвященных проблемам разработки бизнес-логики автоматизированного построения ПГД и ГО, по предмету исследования позволила определить объект исследования (автоматизация и управление технологическими процессами в условиях развивающихся метрополитенов) и предмет исследования (алгоритмы планирования движения поездов метрополитена), доказать актуальность проводимых исследований, выявить основные задачи исследования и подтвердить необходимость комплексного решения задач, связанных со всем жизненным циклом ПГД и ГО.

3. Детальная классификация работ, посвященных проблемам разработки бизнес-логики автоматизированного построения управления транспортными системами, по предмету исследования и математическим методам, применяемым к решению поставленных задач, задала вектор выбора методов проведения диссертационного исследования.

4. Показанная эффективность использования графовых моделей при решении задач автоматизации и управления технологическими процессами на метрополитене подтверждает необходимость расширения множества используемых и создаваемых графовых моделей при автоматизации планирования движения поездов для условий строящегося метрополитена, в частности, для построения методики автоматизации и решения задач организации ночной расстановки составов на линии.

5. Выполненное обоснование использования ГА для решения оптимизационных задач планирования перевозочного процесса метрополитена дало возможность продолжить решение задачи автоматизированного построения ГО с использованием различных критериев оптимальности, что имеет особое значение в условиях строящегося метрополитена.

2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

2.1 Модели процессов, связанных с построением ПГД

Выполненный анализ литературы показал тесное взаимодействие систем планирования и управления движением поездов, необходимость единого подхода к решению задач планирования движения поездов, технического обслуживания подвижного состава и инфраструктуры, а также применимость современных достижений в области компьютерных наук к решению рассматриваемых задач.

В стандарте ИСО 9004-1-94. Управление качеством и элементы системы качества введено понятие жизненного цикла изделия – совокупности процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта [131]. Существует множество моделей жизненного цикла изделия и в частности АСУ ТП: визуализация управления транспортными проектами и построения плановых графиков движения поездов [132]. Тесно связанным с понятием жизненного цикла является понятие информационной поддержки процессов жизненного цикла изделий (ИПИ) или *CALS*-технологий (*Continuous Acquisition and Lifecycle Support*) – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий) – подход к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоемкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия.

В нашем случае в качестве изделия могут рассматриваться ПГД и ГО, а средства их автоматизированного построения и сопровождения на всех стадиях жизненного цикла – как системы, реализующие *CALS*-технологии. По аналогии

с понятием жизненного цикла изделия и АСУ ТП можно ввести понятие жизненного цикла ПГД и ГО, V-образная модель которого представлена на Рисунке 2.1. Процессы, входящие в жизненный цикл ПГД и ГО, можно объединить в процесс сбора и анализа данных ПГД и ГО. Построим модели трех процессов, входящих в жизненный цикл ПГД и ГО:

- модель процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО, представленная на Рисунке 2.2;
- модель процесса автоматизированного построения ПГД и ГО, представленная на Рисунке 2.3;
- модель процесса автоматизированного анализа ПГД и ГО и передачи заинтересованным службам, представленная на Рисунке 2.4.

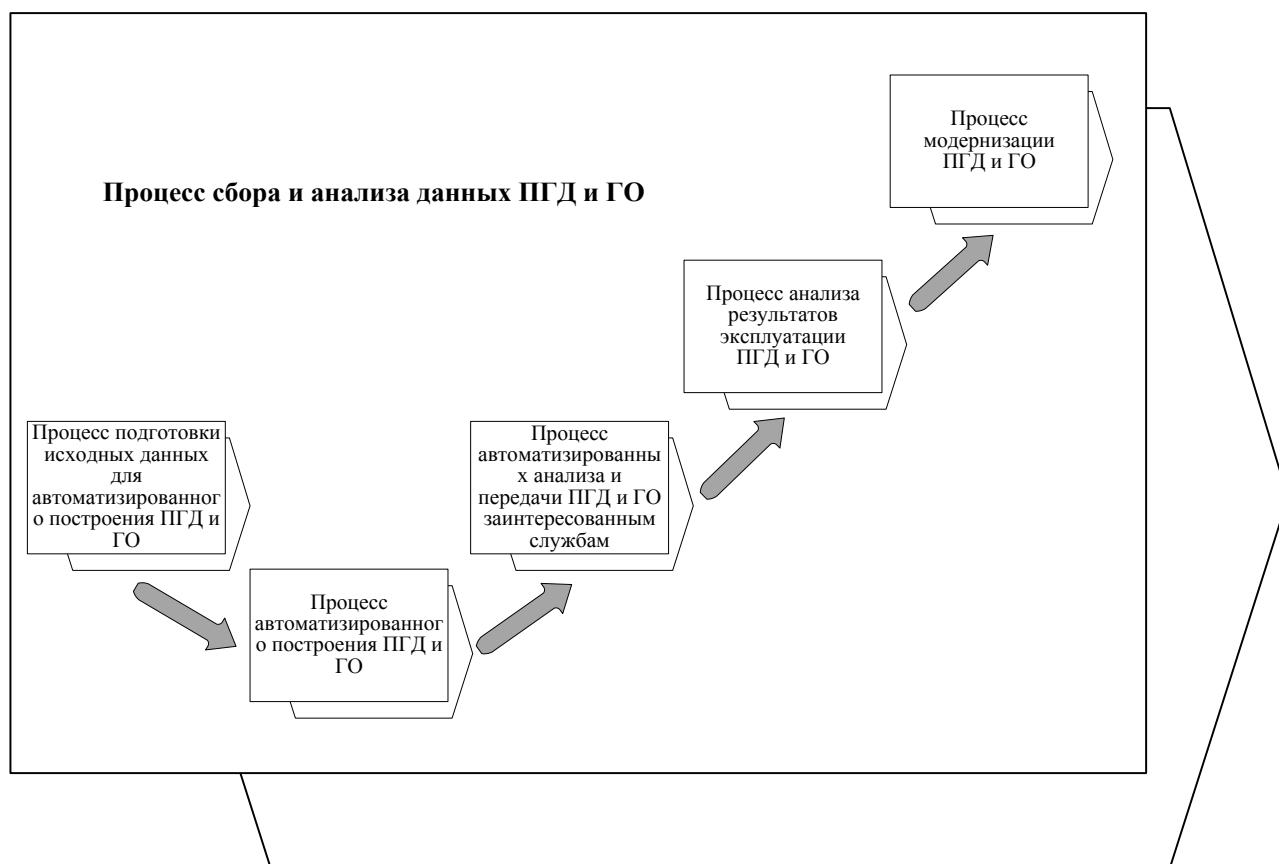


Рисунок 2.1 – V-образная модель жизненного цикла ПГД и ГО

Для решения этой задачи используем нотацию *EPC* (*Event-driven Process Chain* – событийная цепочка процессов). Пример ее применения для решения аналогичной задачи – укрупненная диаграмма технологического процесса сбора и анализа данных, являющихся исходными для построения ПГД и ГО, представленная в статье [26].

В моделях процессов, представленных на Рисунках 2.2–2.4, у каждой функции есть один или несколько владельцев. Эту информацию можно получить из диаграммы прецедентов, построенной для рассматриваемых процессов с использованием языка *UML* [133]. Диаграмма прецедентов – это технология определения функциональных требований к системе. Работа прецедентов заключается в описании типичных взаимодействий между пользователями системы и самой системой и предоставлении описания сценариев. Из диаграммы, представленной на Рисунке 2.5, видно, что процесс сбора и анализа данных ПГД и ГО, требует взаимодействия различных структурных подразделений метрополитена, отражает коммуникации, в которые вступают актеры (множество логически связанных ролей в *UML*, исполняемых при взаимодействии с прецедентами или сущностями (система, подсистема или класс)), задействованные в процессе, и служит исходными данными для формирования множества сценариев средств автоматизации и разработки интерфейса средств автоматизации. Диаграмма помогает определить точки стыковки создаваемых средств автоматизации с другими средствами автоматизации.

Разработанные модели процессов являются основой для успешного выполнения следующих этапов разработки средств автоматизации построения ПГД и ГО [22]:

- формирование множества задач, решаемых в процессе построения ПГД;
- формирование множества сценариев, представляющих собой формализованные схемы решения задач пользователей и, как правило, включающих в себя диалог пользователя и средств автоматизации;
- разработка математического обеспечения средств автоматизации;
- разработка программного обеспечения средств автоматизации, включающая в себя:
 - выбор схемы, применяемой для создания программного обеспечения;

- реализация сценариев решения задач пользователей;
- определение множества элементов и разработка интерфейса средств автоматизации.

Процесс автоматизированного построения ПГД и ГО реализует рекурсивную процедуру исполнения сценариев построения процессов ПГД, которая включает в себя функции, алгоритмы функционирования которых созданы в работах авторов, перечисленных на Рисунке 1.2.

Созданные в ходе диссертационного исследования алгоритмы дополняют ранее накопленную на кафедре «УиЗИ» РУТ(МИИТ) базу знаний алгоритмов автоматизированного планирования движением поездов метрополитена, объединенных в рекурсивную процедуру автоматизированного построения ПГД [134]. Зеленым цветом на схеме этой процедуры, представленной на Рисунке 2.6, выделены те процессы, на степень автоматизации которых повлияли результаты, полученные мною в ходе диссертационного исследования.

В ходе подробного анализа процессов подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО и автоматизированного построения ПГД и ГО были выявлены две процедуры, требующие тщательной проработки:

1. Автоматическое определение последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, которое позволит выполнить учет всех возможных вариантов выхода из ночной расстановки в начале движения и ухода на ночную расстановку в конце движения, увеличить число рассматриваемых вариантов построения ПГД, повысить вероятность нахождения решением поставленной задачи после рассмотрения меньшего числа вариантов, и повысить качество ПГД.

2. Задача сокращения времени, затрачиваемого на построение прототипа ГО, так как в процессе согласования ПГД и ГО может возникнуть задача неоднократной модификации прототипа ГО с учетом изменения исходных данных.

Решению этих задач посвящены 3 и 4 главы диссертации.

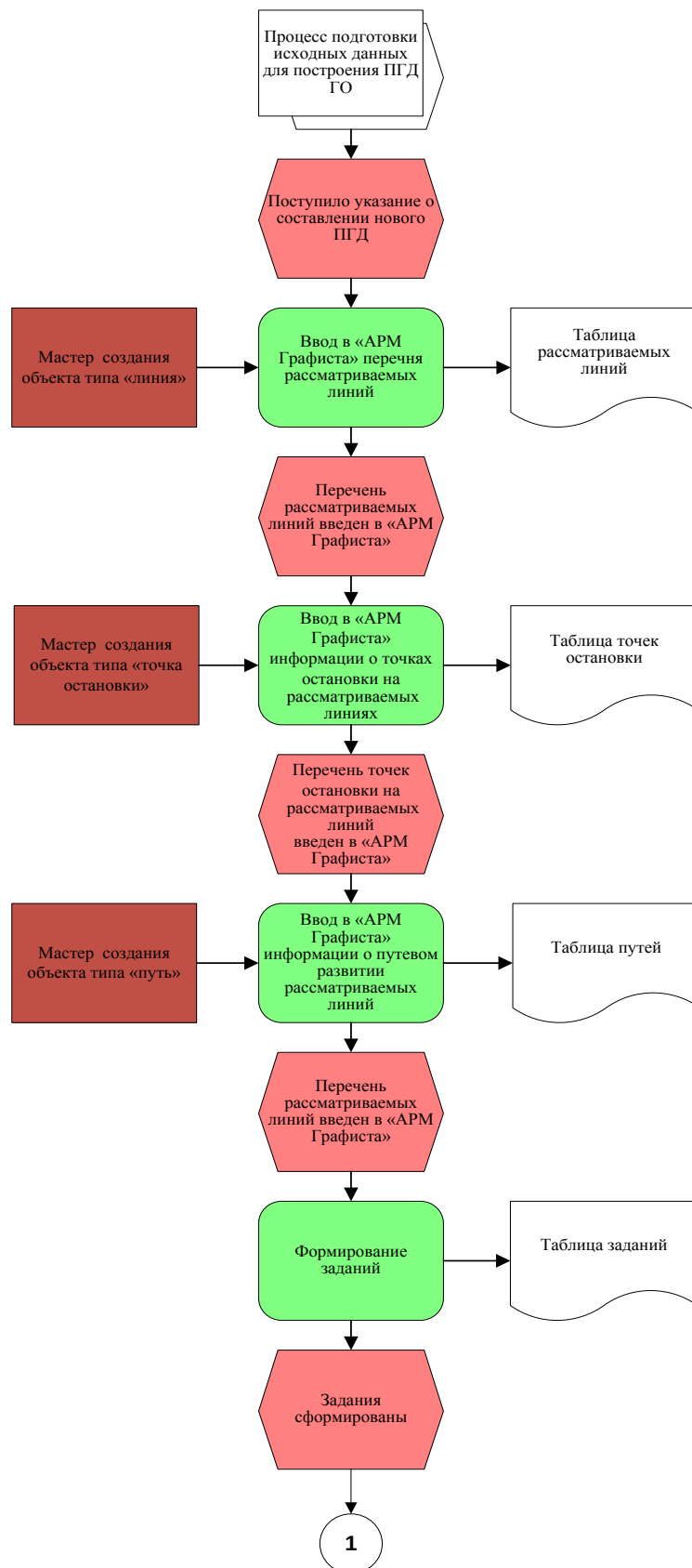


Рисунок 2.2 – Модель процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО (начало)

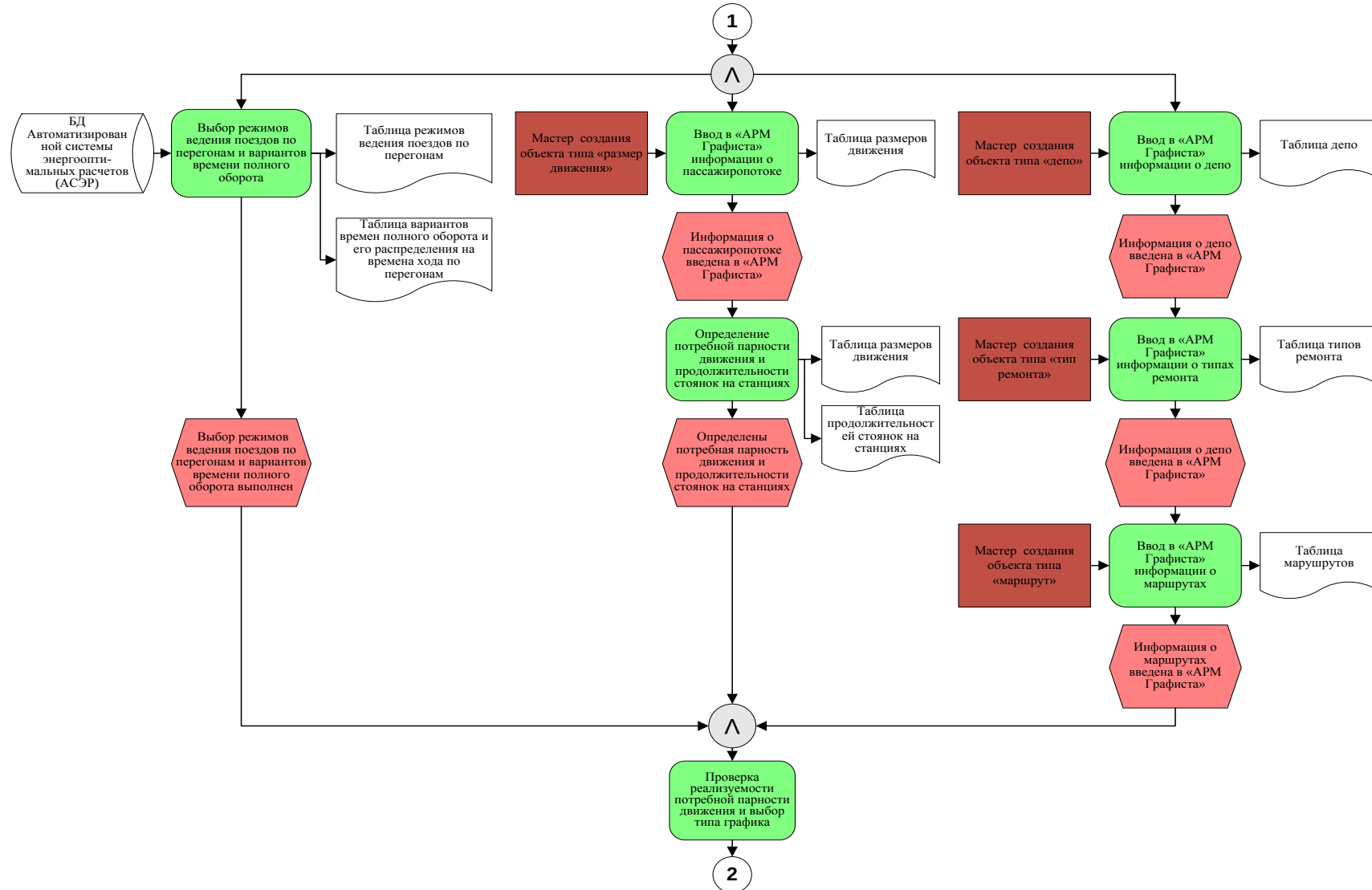


Рисунок 2.2 – Модель процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО

(продолжение)



Рисунок 2.2 – Модель процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ППД и ГО
(продолжение)

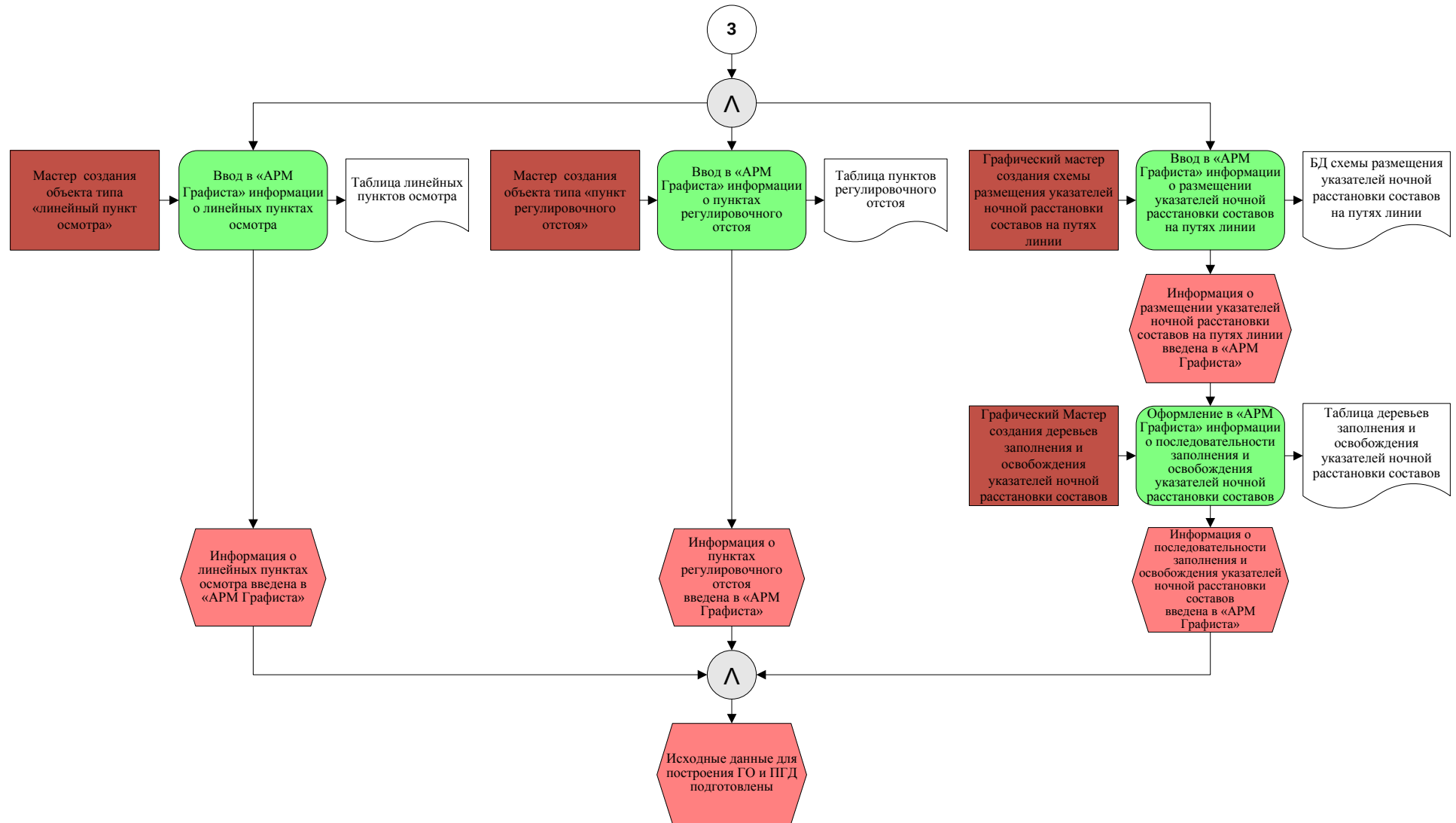


Рисунок 2.2 – Модель процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО
(окончание)

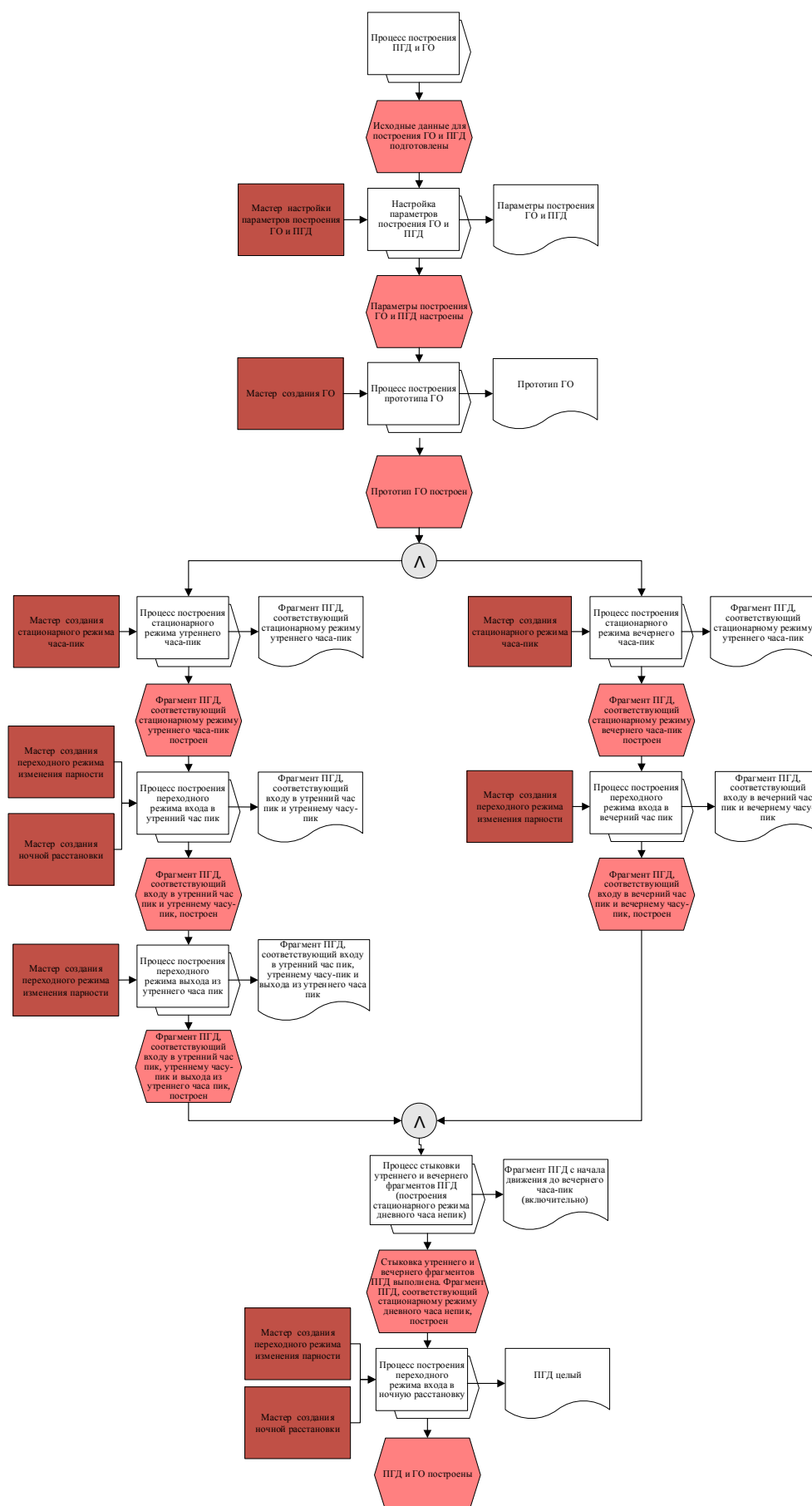


Рисунок 2.3 – Модель процесса автоматизированного построения ПГД и ГО

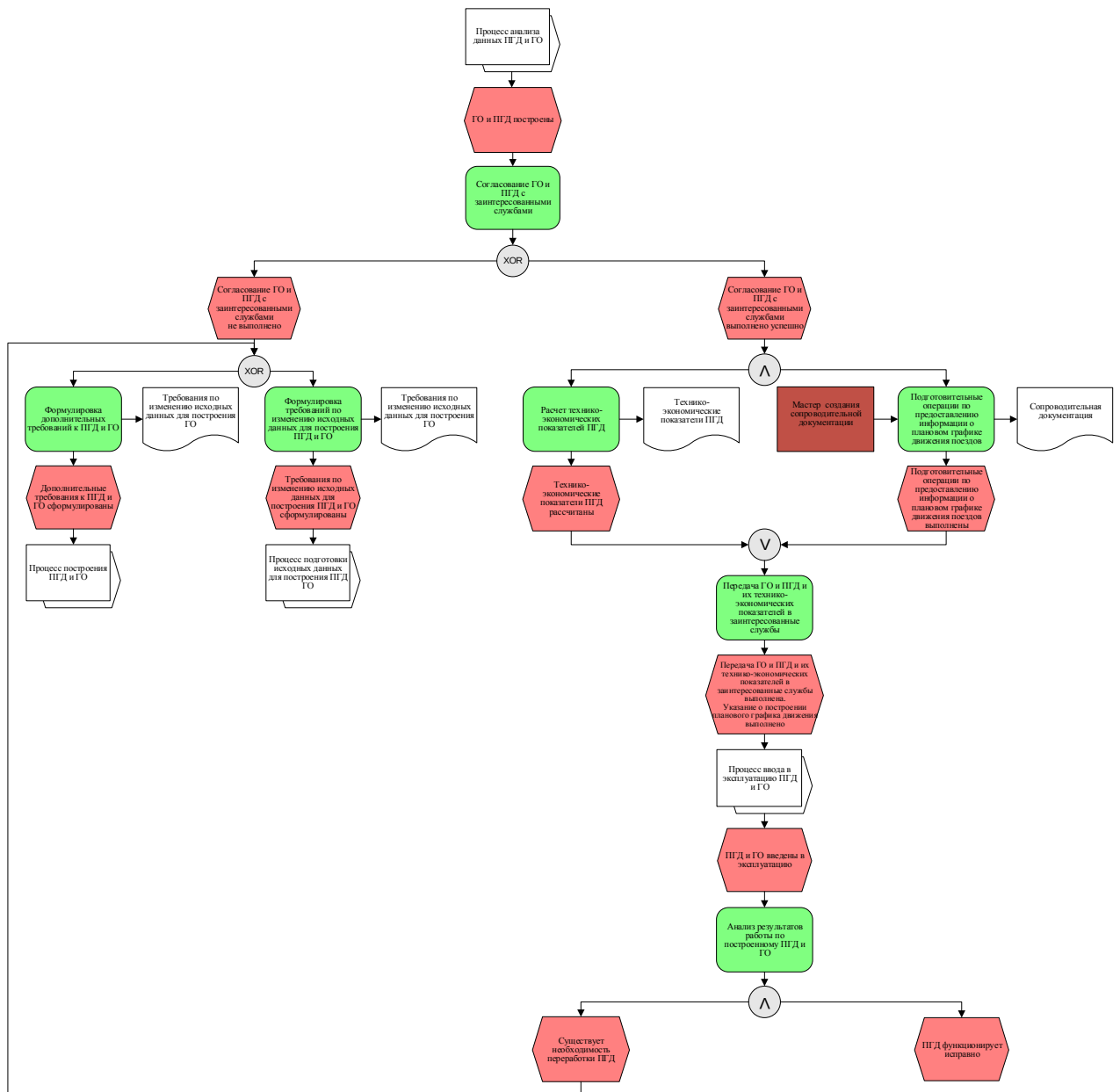


Рисунок 2.4 – Модель процесса автоматизированных анализа и передачи заинтересованным службам ПГД и ГО

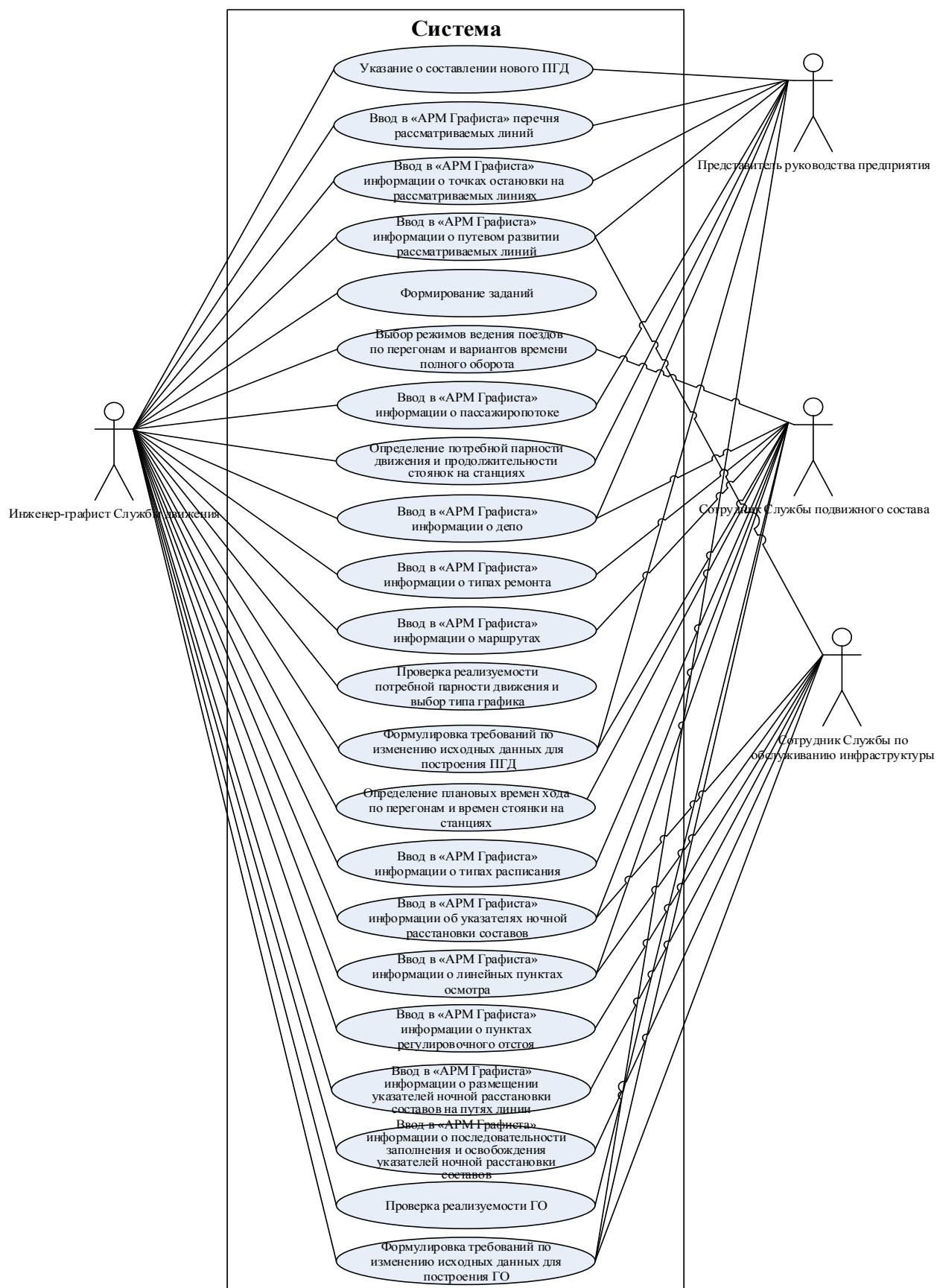


Рисунок 2.5 – Диаграмма прецедентов процесса сбора и анализа данных ПГД и ГО

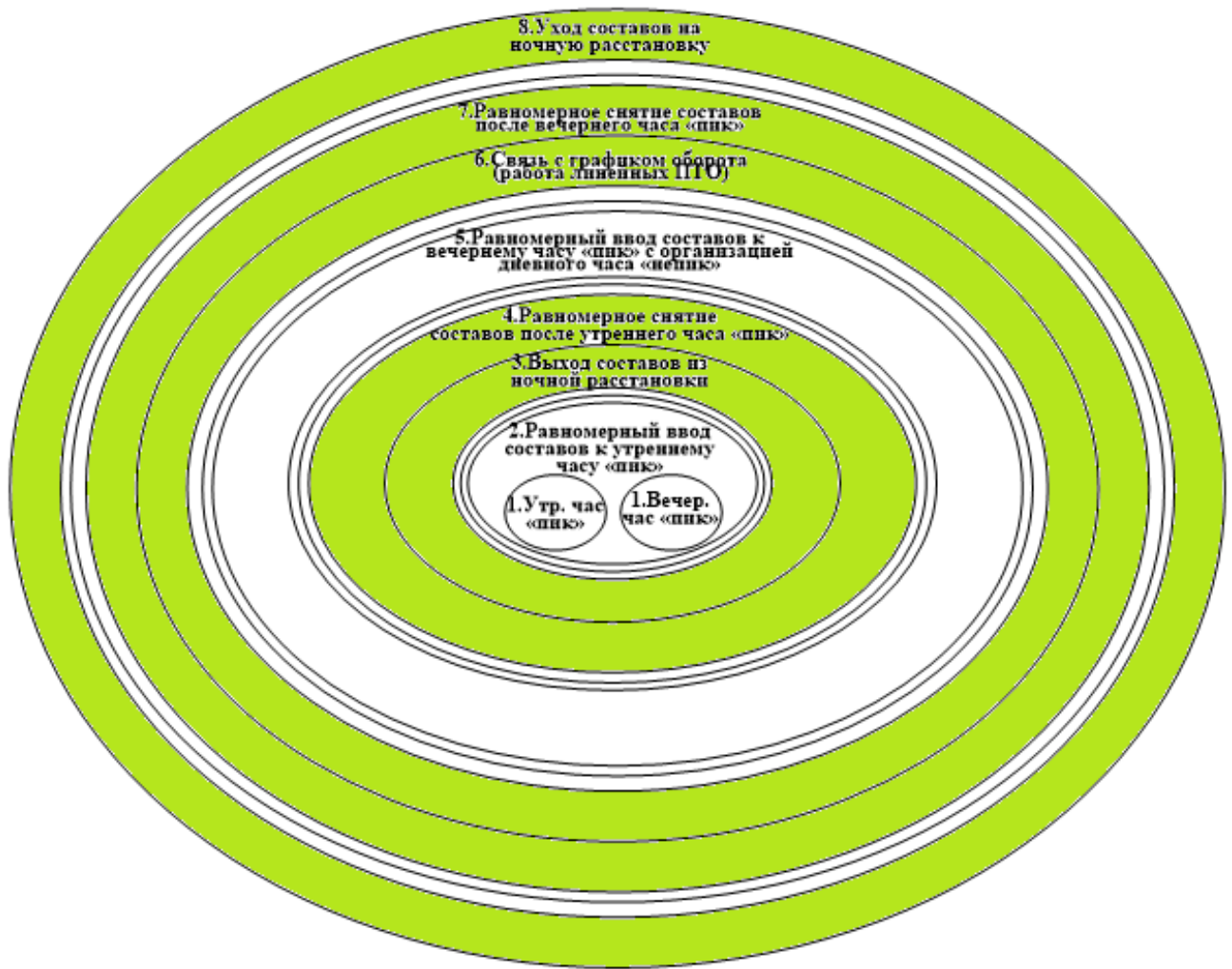


Рисунок 2.6 – Схема рекурсивной процедуры автоматизированного построения ПГД

2.2 Выбор методологии автоматизации планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов. Выбор методологии построения АСП ПГД ППМ

2.2.1 Выбор схемы, применяемой для создания АСП ПГД ППМ

Одной из распространенных схем, применяемых для создания программных продуктов, которыми чаще всего и являются средства автоматизации, является

схема *Model-View-Controller* (MVC, Модель-Представление-Контроллер) [135] [136]. Эта схема представлена на Рисунке 2.7 Логика работы программных продуктов, построенных с использованием схемы MVC, может быть различной, что объясняет присутствие на схеме резервирующих друг друга связей [22].



Рисунок 2.7 – *Model-View-Controller* (MVC, Модель-Представление-Контроллер)

Схема работает следующим образом. Пользователь выбирает с использованием Представления объект управления на экране (связь 1). Представление отправляет запросы пользователя Контроллеру (связь 2). Контроллер инициирует изменение состояния Модели в соответствии с запросами пользователя (связь 4). Модель передает Контроллеру информацию об изменении своего состояния в результате реализации бизнес-логики (связь 6). Контроллер передает команду на отображение изменений состояния модели на экране Представлению (связь 7).

Вместо связей 1 и 2 может использоваться связь 3. Наличие «горячих» клавиш и работа с клавиатурой позволяют пользователю осуществлять выбор команд управления, не обращаясь напрямую к графическим объектам управления,

представленным на экране, минуя Представление. В этом случае пользователь непосредственно контроллеру передаёт команды по управлению моделью.

Вместо связей 2 и 4 может использоваться связь 5. В этом случае запросы пользователя передаются от представления к модели, минуя контроллер.

Вместо связей 6 и 7 может использоваться связь 8. В этом случае Модель напрямую обновляет Представление в соответствии с результатами реализации бизнес-логики.

Использование связей 5 и 8 соответствует случаю использования Активной модели [133].

Средства автоматизации, в разработке которых участвовали сотрудники кафедры «УиЗИ» РУТ (МИИТ), на которой выполнено диссертационное исследование, использовали различные подходы в рамках модели *MVC*.

Тренажер поездного диспетчера, который имеет в своем составе несколько автоматизированных рабочих мест, используемых для различных видов Представления результатов работы Модели, объединенные локальной вычислительной сетью, для отображения информации использует связи 6 и 7, то есть Модель передает информацию Представлению через Контроллер [84].

АСП ПГД ППМ напротив использует связь 8, то есть Модель напрямую передает информацию Представлению [34].

Схема *Model-View-Controller* обладает рядом преимуществ.

Во-первых, при использовании этой схемы бизнес-логика, реализованная в Модели, отделена от её визуализации (Представления, вида). Контроллер, связывающий пользователя и систему, контролирует ввод данных пользователем, а также использует Модель и Представление для реализации необходимой реакции [133].

Наличие развитого интерфейса системы «АРМ Графиста–2.0» и, как будет показано ниже, большого количества разнообразных действий, выполняемых системой, делает актуальным использование паттерна «Команда» («*Command*»), который позволяет инкапсулировать действие в объект и отделить инициатора этого действия от его исполнения.

Во-вторых, при использовании схемы *MVC* изменение реакции на действия пользователя приводит только к использованию другого контроллера, что является актуальным в условиях постоянного развития.

В-третьих, в случае, если ряд разработчиков специализируется только в одной из областей: либо разрабатывают графический интерфейс, либо разрабатывают бизнес-логику, возможно реализовать эффективное разделение труда.

В следующем пункте подробнее рассмотрено первое преимущество схемы, выбранной для создания АСП ПГД ППМ.

2.2.2 Создание Представления АСП ПГД ППМ

За счет разделения Модели и Представления повышается возможность повторного использования результатов функционирования Модели [135]. Рассмотрим это на примере АСП ПГД ППМ (Рисунок. 2.8).

Для визуализации результатов построения ПГД используются две формы Представления:

- графическое, которое используется в ходе диспетчерского управления движением поездов и передается во все службы метрополитена;
- табличное (расписание движения поездов), выдаваемое машинистам поездов и загружаемое в автоматизированные средства управления движением поездов (поездные устройства автоведения, автоматизированные средства построения графика исполненного движения и др.).

Для визуализации ПГД в графической форме используется две традиционных формы:

- плановый график движения; при использовании этой формы представления ПГД отображается на координатной плоскости, на которой осью абсцисс является ось астрономического времени, а осью ординат является ось уровней станций линии;



Рисунок 2.8 – Модель и Представление

– график оборота подвижного состава; при использовании этой формы представления ПГД отображается на координатной плоскости, на которой осью абсцисс является ось астрономического времени, а осью ординат является ось маршрутов (составов с присвоенными им на сутки номерами).

В работах разных авторов встречаются и другие подходы к визуализации ПГД [36].

Расписание движения поездов представляет собой таблицу с заголовком. Заголовок содержит информацию о поезде и соседних поездах. Строки таблицы соответствуют станциям линии. Столбцы содержат информацию о названии станции, времени отправления поезда со станции (для конечной станции – времени прибытия на станцию) и продолжительности сверхнормативных стоянок на станциях.

Разнообразие свойств линий метрополитена и их развитие [34] делает необходимым включение в состав АСП ПГД ППМ средств настройки представлений, которые на Рисунке 2.9 представлены в виде Мастеров.

Редактирование Маршрута

Общие сведения о маршруте

Номер маршрута: Маршрут №001 выход: [X] --> Маршрут №002

Депо приписки: Депо Новогиреево (Код 1) по первому пути на станцию Новогиреево

Место ночевки: 1 ст. п. ук. 1

Сведения о ремонтах

№	Тип Ремонта	Место проведения	Выход из депо	Продолжительность
1	Тип ремонта 'ТО'	1 Новогиреево	☐	☐

Добавить ремонт Удалить ремонт

Удалить Сохранить Отменить

Рисунок 2.9 – Мастер создания объекта типа «Маршрут».

Наличие обширной базы данных (БД), ее постоянное обновление, разнотипность объектов линии метрополитена, наличие тесных связей между объектами требует создания развитого интерфейса работы с БД, что нашло свое отражение в Представлении анализируемого программного продукта.

Выделяются следующие типы объектов (ресурсов) линии, информация о которых хранится в БД и используется при построении ПГД и его визуализации [137]:

- линия или участок линии;
- путь;
- точка остановки, которой может быть платформа станции или другая точка главных путей, в которой поезд может остановиться для изменения направления движения или выполнения сверхрежимной стоянки;
- депо;
- указатель ночной расстановки составов;
- линейный пункт осмотра подвижного состава;
- пункт регулировочного отстоя (место на линии, где находятся маршруты, не участвующие в пассажирском движении);
- тип ремонта или осмотра подвижного состава;
- маршрут (состав с присвоенным ему на сутки номером, который определяет его движение в соответствии с ПГД и ГО ЭПС).

В состав Представления входят текстовые Мастера создания объектов, индивидуально построенные для каждого из типа объекта линии, позволяющие редактировать атрибуты объектов, создавать новые объекты и удалять невостребованные объекты. На Рисунке. 2.9 представлен фрагмент интерфейса системы «АРМ Графиста–2.0» – Мастер создания объекта типа «Маршрут».

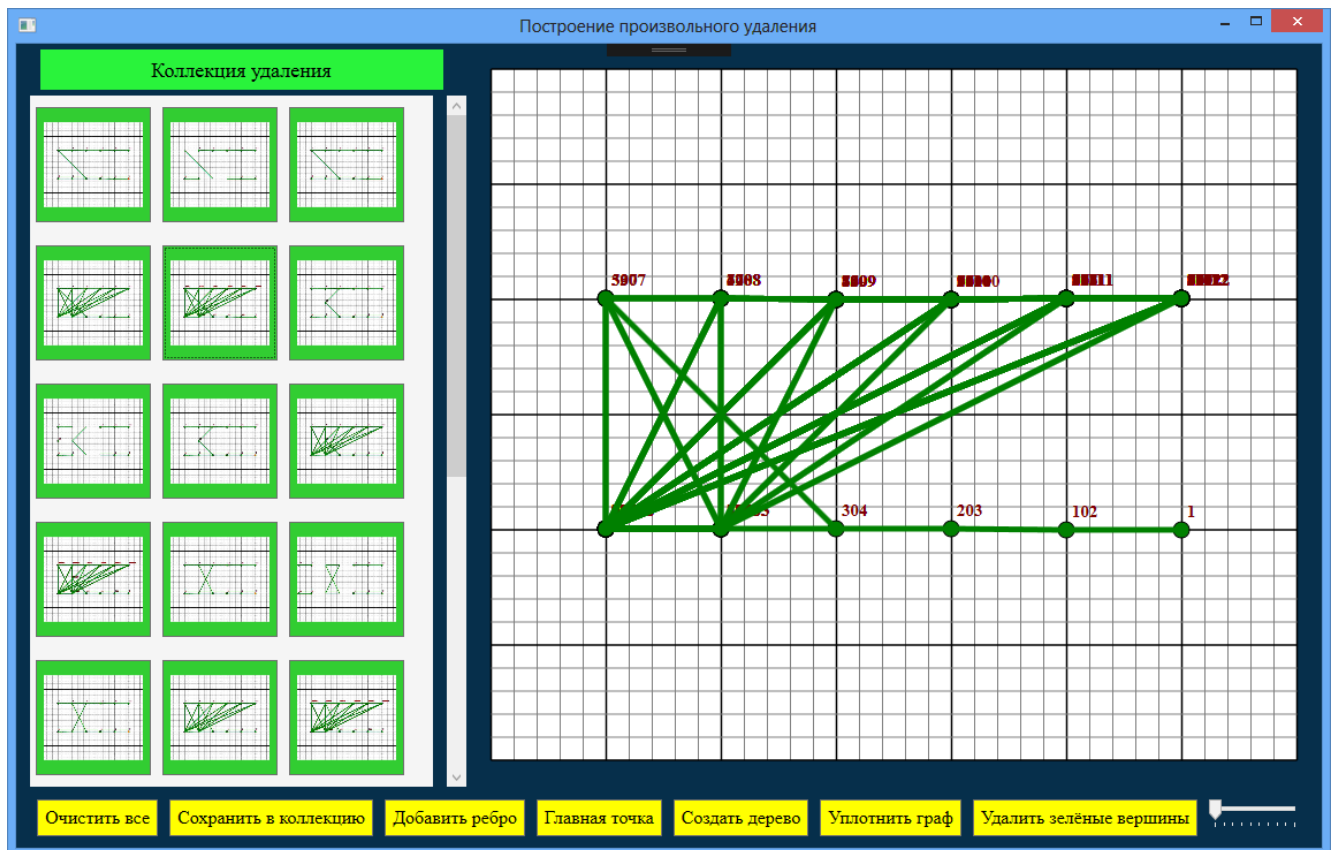
Необходимость хранения в БД информации о связях между разнотипными объектами или о группах однотипных объектов сделало необходимым добавление специализированных редакторов. К ним относятся:

– редактор типов расписаний. Под типом расписания будем понимать информацию, описывающую движение поезда между конечными станциями пути в зависимости от заданного времени хода по пути в случае отсутствия сверхнормативных стоянок на станциях и времени отправления с первой станции, равно нулю. Редактор включает в себя:

- текстовый Мастер типов расписаний;

- редактируемую таблицу плановых времен хода по перегонам и времен стоянки на станциях для заданного типа расписания;
- редактор связей указателей ночной расстановки составов включает в себя:
 - Мастер создания объектов типа «указатель ночной расстановки составов»;
 - графический Мастер создания схемы размещения указателей ночной расстановки составов;
 - графический Мастер создания деревьев заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов [31], представленный на Рисунке 2.10;
- редактор образов, соответствующих маневровым передвижениям в начале / конце нитки, включает в себя [138]:
 - графический Мастер создания образов, соответствующих маневровым передвижениям в начале / конце нитки;
 - таблица с текстовым описанием образов, соответствующих маневровым передвижениям в начале / конце нитки.

Принципиальным отличием Мастера создания от других элементов Представления, связанных с БД, является то, что в них возможно добавление новых или удаление невостребованных элементов соответствующего типа в БД. Другие элементы представления могут только редактировать атрибуты существующих объектов или связи между существующими объектами.



Рисунка. 2.10 – Мастер создания деревьев заполнения и освобождения
указателей ночной расстановки составов

Основные выводы и результаты по главе

1. Обоснован выбор в качестве схемы, применяемой для создания программных средств автоматизации построения ПГД, схемы *Model-View-Controller* (*MVC*, *Модель-Представление-Контроллер*) в связи с тем, что отделение части программного обеспечения, отвечающего за реализацию моделей бизнес-логики, от части программного обеспечения, отвечающего за решение задач визуализации результатов работы средств автоматизации и организации информационного обмена с пользователями, удовлетворяет запросам пользователей и разработчиков разрабатываемых средств автоматизации.

2. Определено множество элементов интерфейса средств автоматизации, входящих в состав Представления.

3. Выполнена декомпозиция процесса сбора и анализа данных графика оборота подвижного состава (ГО) и ПГД на составные части: подготовка исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО; автоматизированное построение ПГД и ГО; анализ и передача заинтересованным службам результатов автоматизированного построения ПГД и ГО, что позволило построить модели процессов, входящих в процесс сбора и анализа данных ПГД и ГО.

4. Показана связь разработанных моделей процессов, входящих в процесс сбора и анализа данных ПГД и ГО, с последующими этапами разработки и внедрения средств автоматизации построения ПГД и ГО.

5. Проведенное моделирование процессов и построенная на основе разработанных моделей диаграмма прецедентов показали, что процесс сбора и анализа данных ПГД и ГО требует тесного взаимодействия всех подразделений метрополитена на всех этапах планирования и наличия развитых средств автоматизированного обмена информацией между ними.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ЗАПОЛНЕНИЯ И ОСВОБОЖДЕНИЯ УКАЗАТЕЛЕЙ НОЧНОЙ РАССТАНОВКИ СОСТАВОВ НА ЛИНИИ

3.1 Постановка задачи

В модели процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО (Рисунок 2.2) и на диаграмме прецедентов процесса сбора и анализа данных ПГД и ГО (Рисунок 2.5) присутствуют три функции, непосредственно связанные с организацией ночной расстановки составов:

- ввод информации об указателях ночной расстановки составов;
- ввод информации о размещении указателей ночной расстановки составов на путях линии;
- формирование информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов.

Информация, формируемая в ходе выполнения этих функций, имеет существенное значение в процессе построения ПГД. Как правило, все составы не только не могут отправляться в депо во время ночного перерыва в движении из-за нехватки деповских путей и канав, но и не должны это делать с целью поддержания заданного интервала движения между поездами перед таким перерывом и после него. Сценарии построения ПГД должны учитывать информацию о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, так как она влияет на последовательность движения поездов, что имеет большое значение при организации ГО и составлении графика работы локомотивных бригад [96]. Порядок заполнения указателей является функцией местоположения указателей и требований к интервалу времени, когда они должны быть заполнены. Требования к порядку освобождения указателей утром могут отличаться от требований к порядку их заполнения вечером.

Идея использования деревьев для решения задачи определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки

составов была сформулирована в работе [31]. Однако до настоящего времени задача автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов не была решена. Данный раздел диссертационного исследования посвящен решению этой задачи. На Рисунке 3.1 представлена модель процесса формирования информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, детализирующая соответствующую функцию модели процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО (Рисунок 2.2). Переход от термина «функция» к термину «процесс» связан с тем, что в созданной модели детализированы выполняемые действия.

Решенная в диссертационной работе задача формирования последовательностей заполнения и освобождения указателей ночной расстановки формулируется следующим образом. По заданной схеме расположения указателей ночной расстановки на станции метрополитена с заданной схемой путевого развития найти все варианты последовательностей заполнения указателей ночной расстановки, при которых все указатели ночной расстановки, приведенные на схеме расположения, будут заполнены, и все варианты последовательностей освобождения указателей ночной расстановки, при которых все указатели ночной расстановки, приведенные на схеме расположения, будут освобождены. Полученные последовательности заполнения указателей ночной расстановки допускают выполнение маневровых передвижений, необходимых для достижения указателя ночной расстановки после окончания движения по заданному главному пути в заданном направлении, и сверхрежимных выдержек, связанных со сменой кабины управления, но не допускают промежуточные отстои, в частности, у других указателей. Полученные последовательности освобождения указателей ночной расстановки допускают выполнение маневровых передвижений, необходимых для начала движения на заданном главном пути в заданном направлении, и сверхрежимных выдержек, связанных со сменой кабины управления, но не допускают промежуточные отстои, в частности, у других указателей.

В данной главе для автоматизации процесса формирования информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов разработаны и проанализированы результаты работы следующих алгоритмов:

- подготовки исходных данных – по заданным схемам расположения указателей ночной расстановки однозначно строятся раскрашенные графы, в которых точкам расстановки соответствуют вершины одного цвета, стрелочные переводы рассматриваются как вершины другого цвета, а ребра соответствуют путям, соединяющим вершины;

- удаления из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам; исключение из графа параллельных ребер позволяет сделать представление информации более компактным и создать исходный граф для дальнейших преобразований;

- построения дерева, которое содержит пути, соответствующие всем возможным последовательностям заполнения или освобождения указателей ночной расстановки на станции; у каждой вершины этого дерева есть единственное входящее ребро, соответствующее единственному возможному пути от истока к вершине, и множество исходящих ребер, соответствующих всем ветвлениям пути; при таком объемном представлении информации не требуется дополнительная обработка при ее использовании в сценариях построения ПГД;

- уплотнения графа, то есть добавления в исходный граф таких путей, которые при рассмотрении всех возможных вариантов прохождения вершин уплотненного графа позволяют получить тот же набор последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов, что предоставляет соответствующее дерево, т. е. в результате исполнения алгоритма получается дерево, изоморфное ранее построенному; платой за сжатое представление информации является необходимость дополнительной обработки информации при её использовании в сценариях построения ПГД;

- разворачивания «уплотненного» графа в дерево, т.е. дополнительной обработки информации при ее использовании в сценариях построения ПГД.

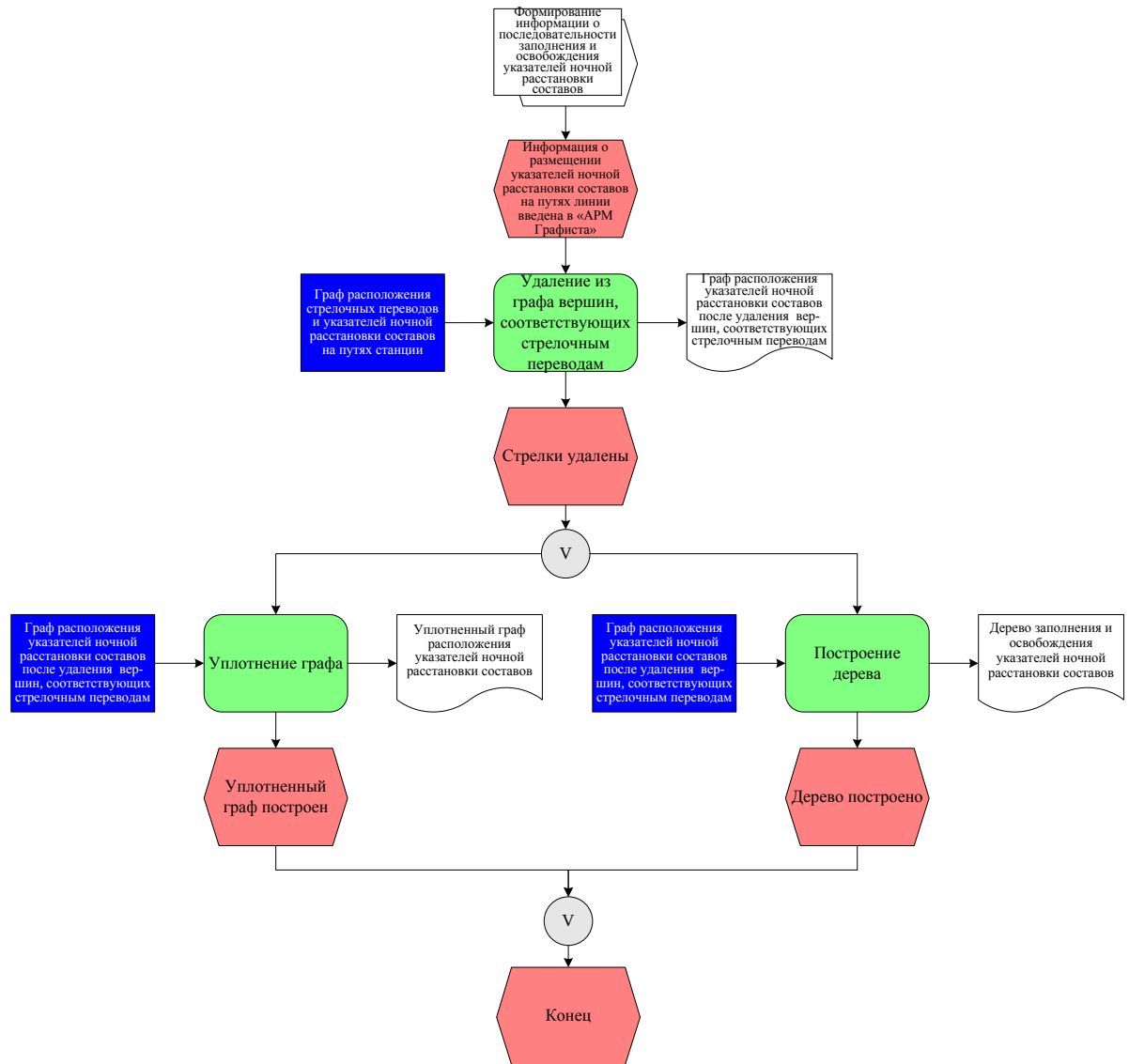


Рисунок 3.1 – Модель процесса формирования информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов

3.2 Подготовка исходных данных

Входным документом для выполнения функций ввода информации об указателях ночной расстановки составов и размещении указателей ночной расстановки составов на путях линии (Рисунок 2.1) являются схемы организации ночной расстановки составов на станциях. После окончания пассажирского движения составы могут находиться в депо или на главных и станционных путях линии у указателей ночной расстановки [139]. Под указателем ночной

расстановки понимается кортеж, компоненты которого содержат следующую информацию:

- наименование и местоположение на путях линии указателя, около которого должна находиться голова состава, назначенного на ночевку в данной географической точке;
- условия (возможность использования при заданном типе расстановки и интервалы времени, когда указатель может использоваться) и результаты использования указателя при построении ПГД (связи с другими объектами ПГД);
- способы графического представления факта использования указателя в ПГД.

Расположение указателей ночной расстановки зависит от топологии линии. На Рисунке 3.2 представлены такие схемы для четырех основных типов станций, существующих на Московском метрополитене [140]:

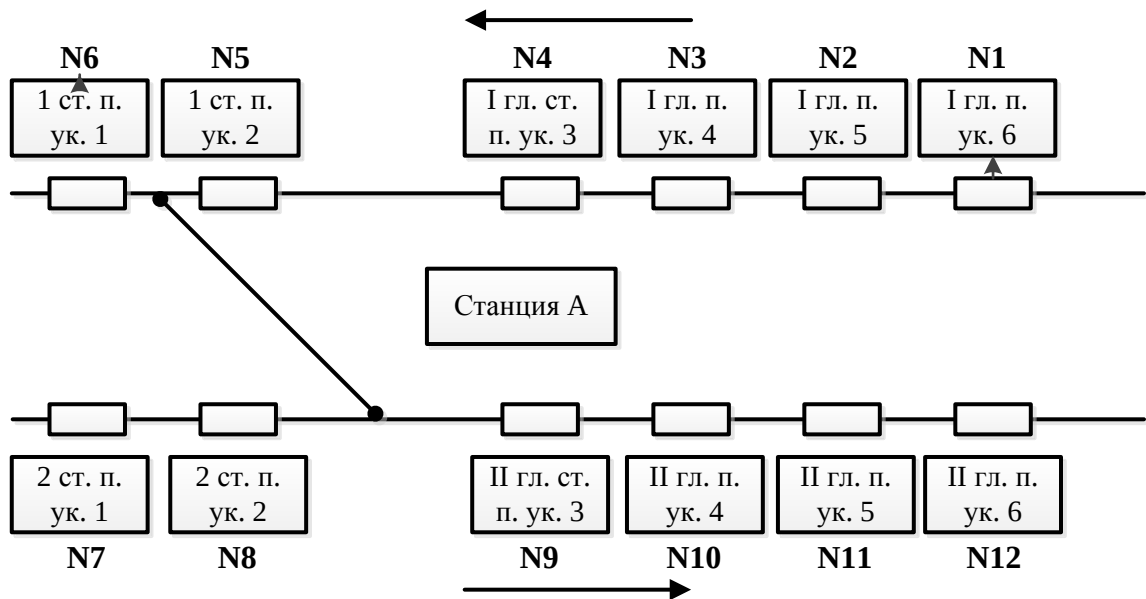
- для двухстрелочной станции (Рисунок 3.2 а).
- для трехстрелочной станции (Рисунок 3.2 б);
- для четырехстрелочной станции (Рисунок 3.2 в);
- для шестистрелочной станции (Рисунок 3.2 г).

Станции любого из рассмотренных типов могут быть как конечными, так и промежуточными, различаться количеством указателей, которые используются одновременно. На схемах представлен наиболее полный набор указателей. При расположении нескольких указателей на одном и том же главном или станционном пути последовательность их заполнения строго определена возможностью достижения их составом, а при освобождении учитывается возможность продолжения беспрепятственного движения в заданном направлении. Последовательность заполнения и освобождения указателей, находящихся на разных станционных путях может варьироваться.

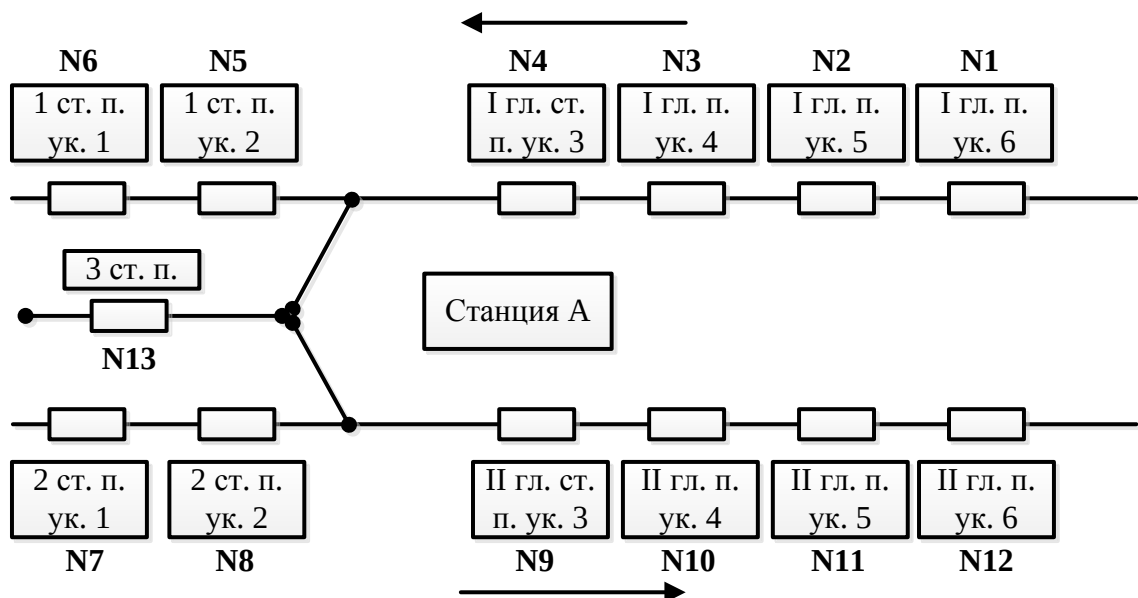
Стрелками обозначено правильное направление движения поездов по главным путям – пошерстное [141]. Требуется своего решения задача автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов

На Рисунке 3.3 представлены фрагменты ПГД, построенных для линий Московского метрополитена, иллюстрирующие последовательность освобождения указателей ночной расстановки для станций, соответствующих схемам на Рисунке 3.2.

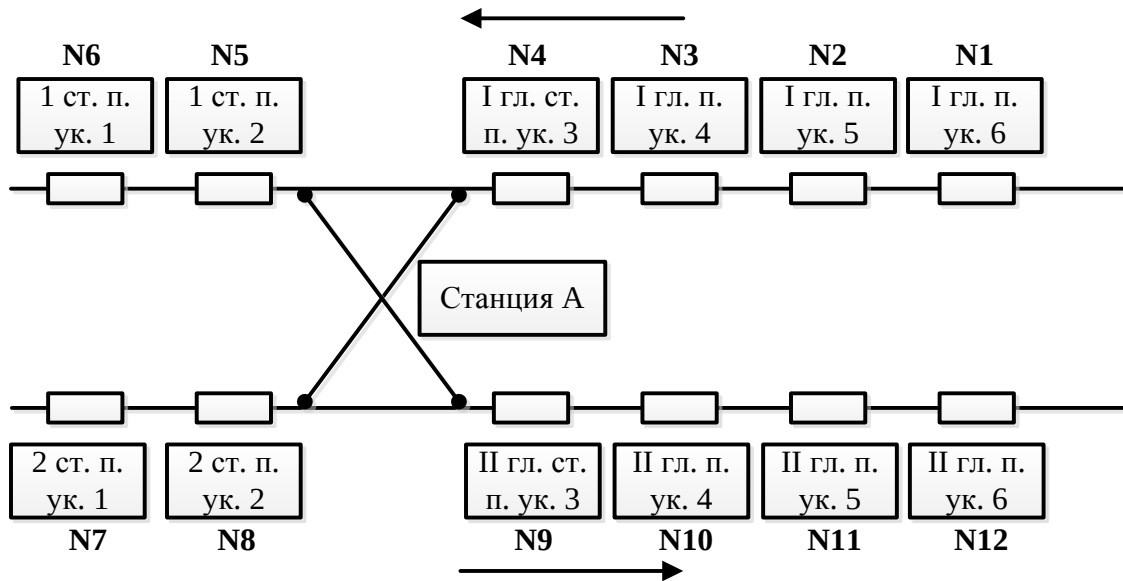
а)



б)



в)



г)

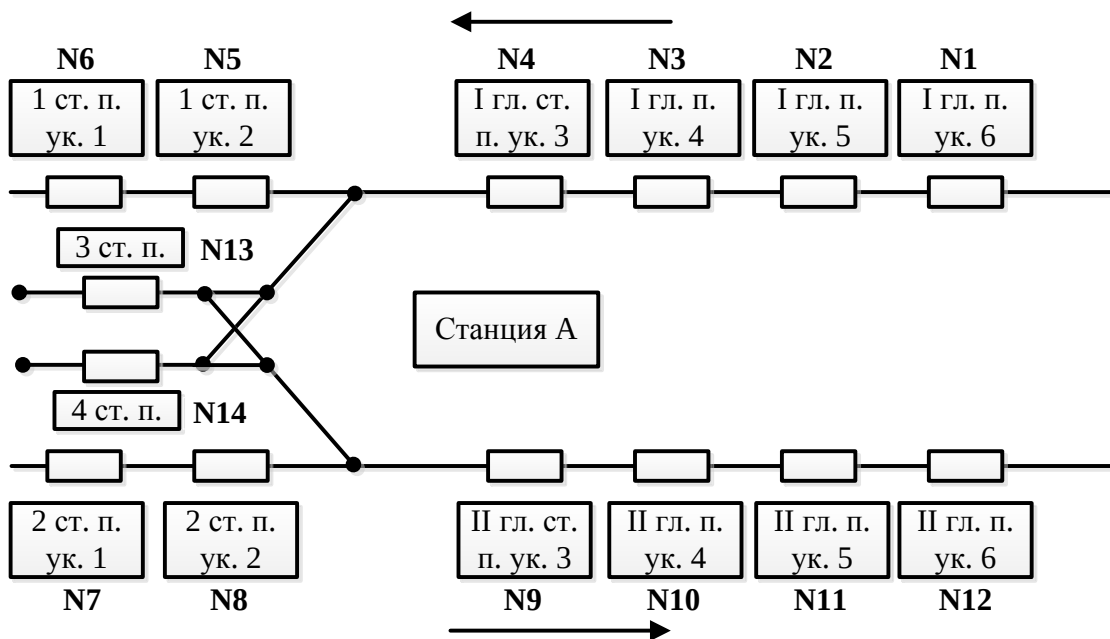


Рисунок 3.2 – Схемы расположения указателей ночной расстановки для основных типов станций, существующих на Московском метрополитене: а) –на конечной двухстрелочной станции; б) –на конечной трехстрелочной станции; в) –на конечной четырехстрелочной станции; г) –на конечной шестистрелочной станции

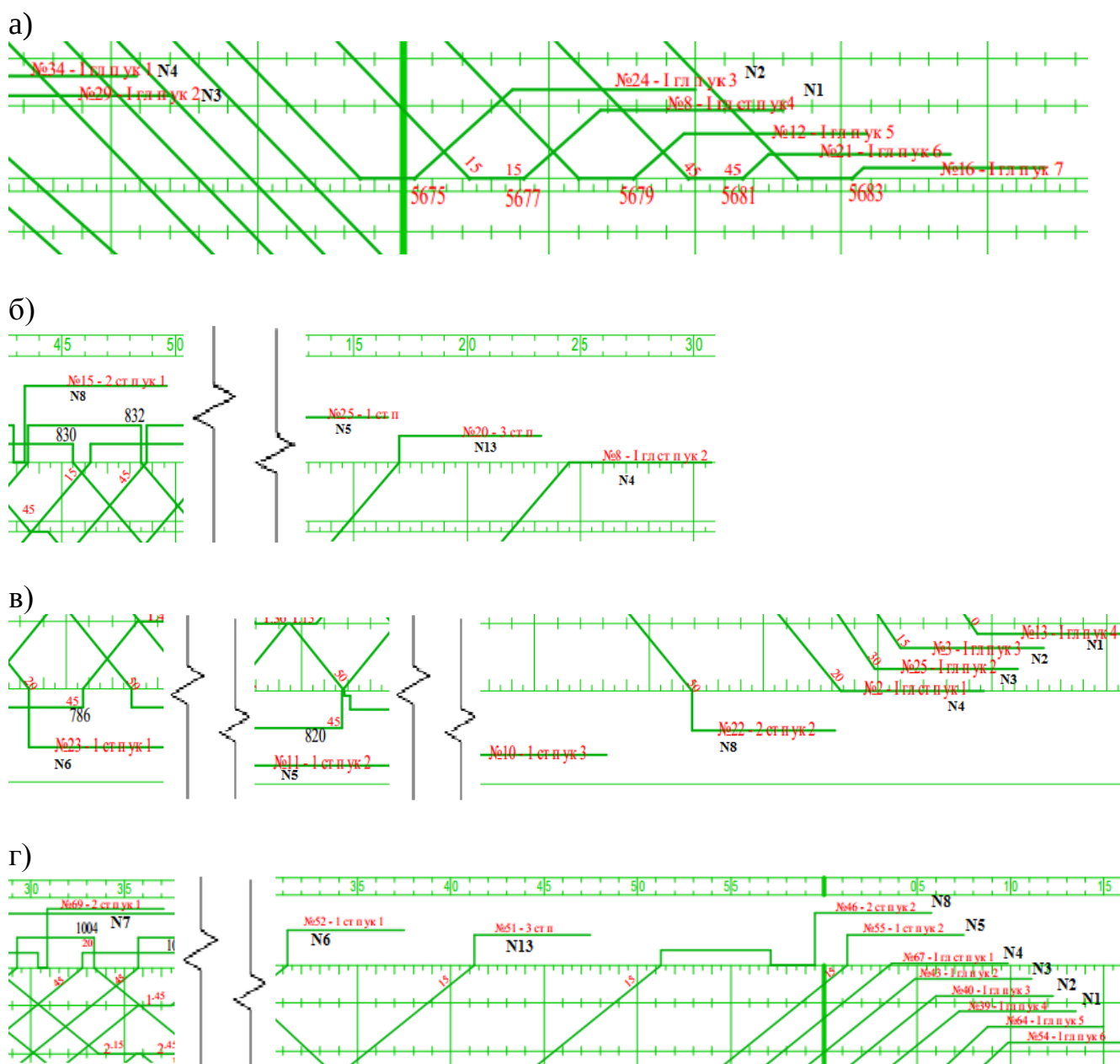


Рисунок 3.3 – Последовательности освобождения и заполнения указателей ночной расстановки в рамках ПГД для различных типов станций, существующих на Московском метрополитене: а) –на промежуточной двухстрелочной станции (станция Баррикадная Таганско-Краснопресненской линии); б) –на промежуточной трехстрелочной станции (станция Третьяковская Калининской линии); в) –на конечной четырехстрелочной станции (станция Юго-Западная Сокольнической линии); г) –на конечной шестистрелочной станции (станция Речной вокзал Замоскворецкой линии)

После выполнения функций ввода информации об указателях ночной расстановки составов и размещении указателей ночной расстановки составов на путях линии (Рисунок 2.1) в распоряжении владельцев функций (инженер-графист Службы движения и сотрудник Службы по обслуживанию инфраструктуры) таблица указателей ночной расстановки составов и граф, отражающий информацию о взаимном расположении указателей ночной расстановки составов и стрелочных переводов на путях каждой станции (база данных размещения указателей ночной расстановки составов на путях линии).

Исходной информацией для решения поставленной задачи построения ГО является схема организации ночной расстановки составов на станции, по которой строится граф, отражающий информацию о взаимном расположении указателей ночной расстановки составов и стрелочных переводов на путях станции. На Рисунке 3.4 представлены такие графы, полученные на основе информации, визуализированной на Рисунке 3.2. Представленные на Рисунке 3.4 графы раскрашены в три цвета:

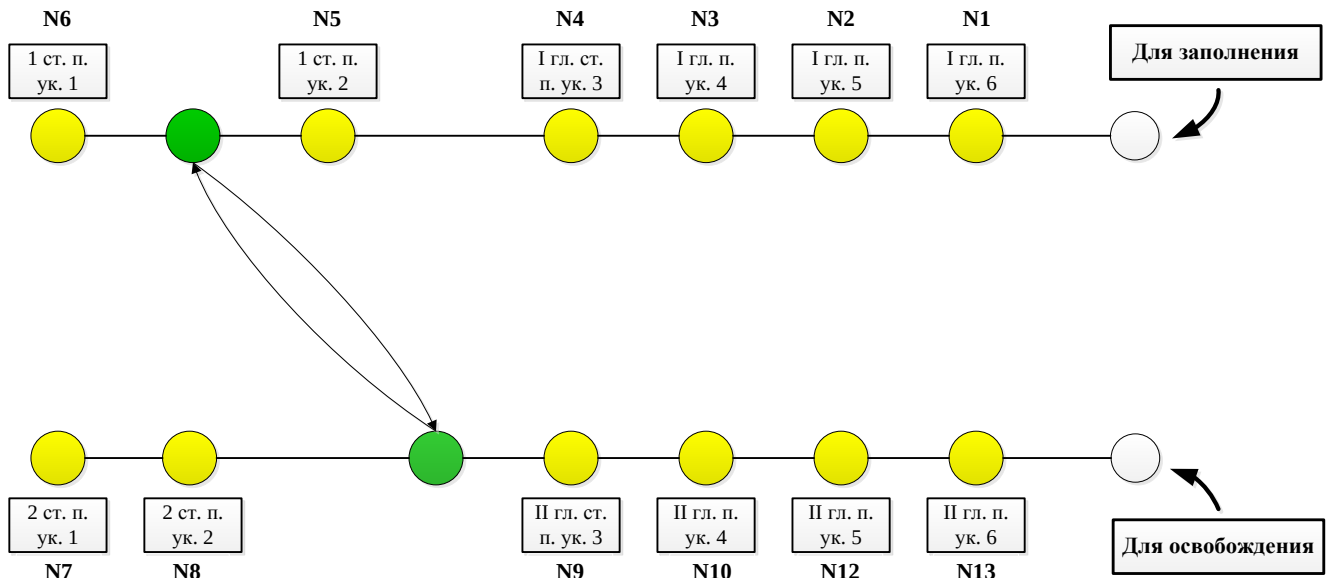
- желтый цвет используется для раскрашивания вершин, соответствующих указателям;
- белый цвет используется для раскрашивания вершины, соответствующей точке начала освобождения указателей или завершения заполнения указателей. Первыми освобождаются или последними заполняются указатели, которым соответствуют вершины, смежные с белой, т.е. соединенные с ней ребром. В зависимости от того, какое действие выполняется (освобождение или заполнение указателей и в каком направлении) меняется местоположение белой вершины на графе. Вершине белого цвета в построенном дереве будет соответствовать исток;
- зеленый цвет используется для раскрашивания вершин, соответствующих стрелочным переводам [139].

Рассматриваемый граф является смешанным, содержащим как ориентированные, так и неориентированные ребра в зависимости от их положения относительно зеленых вершин:

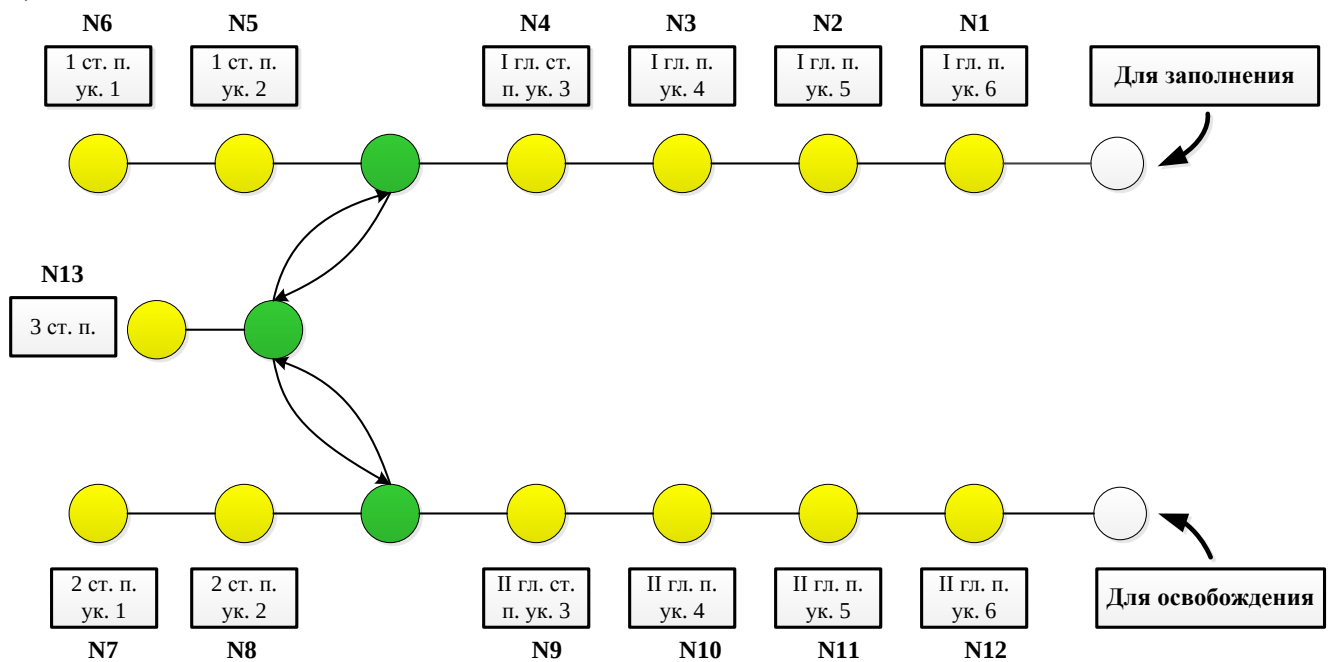
– ребро направленное и его концом является зеленая вершина, если оно подходит к зеленой вершине в пошерстном направлении (движение по стрелочному переводу в направлении от крестовины к его острьякам);

– ребро ненаправленное во всех остальных случаях.

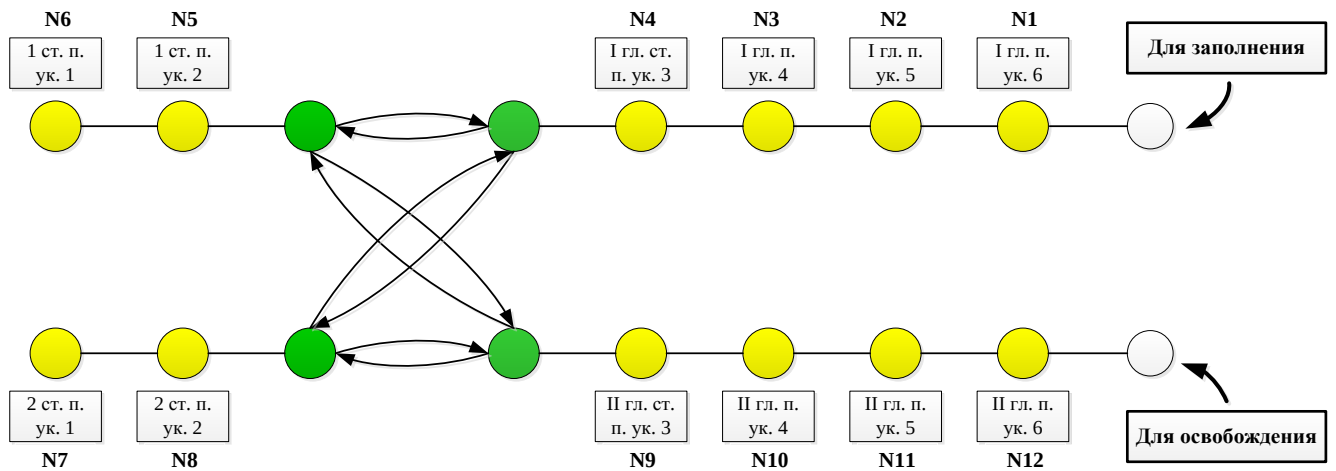
а)



б)



в)



г)

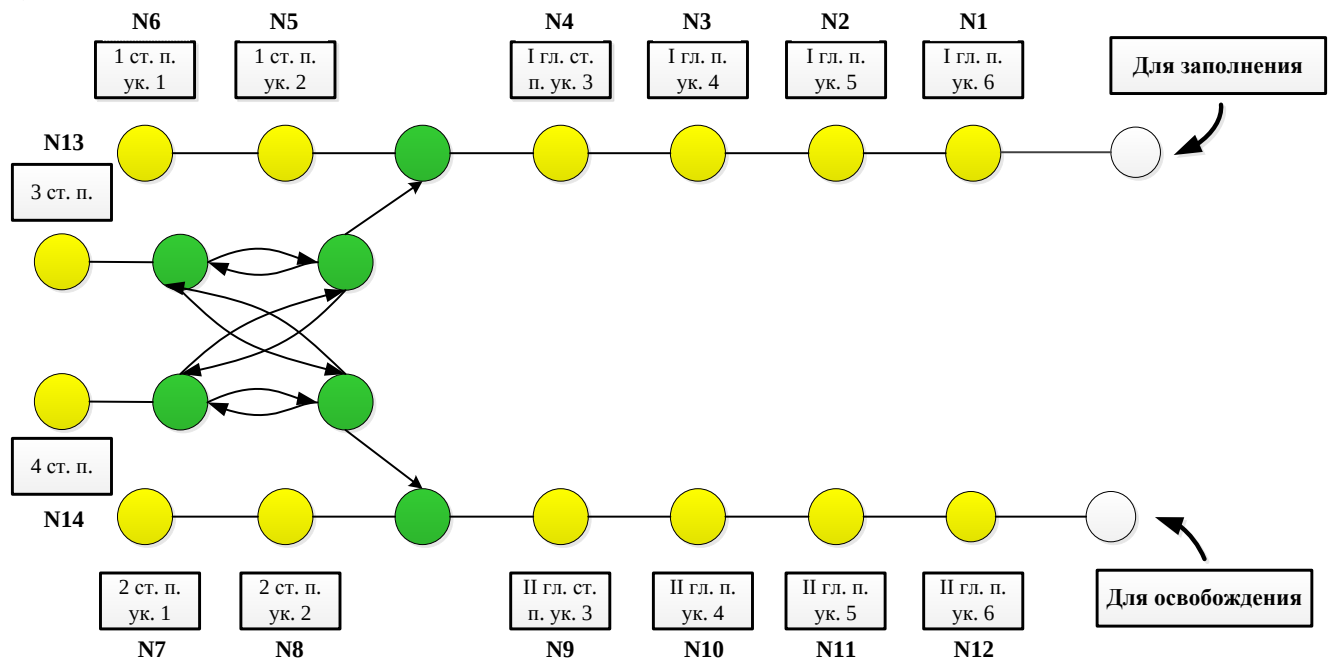


Рисунок 3.4 – Графы, полученные по схеме расположения указателей ночной расстановки для основных типов станций, существующих на Московском метрополитене: а) –на конечной двухстрелочной станции; б) –на конечной трехстрелочной станции; в) –на конечной четырехстрелочной станции; г) –на конечной шестистрелочной станции

В исходном графе каждому стрелочному переводу соответствует своя зеленая вершина, которой инцидентны как минимум три ребра: одно неориентированное или ориентированное, началом которого является эта зеленая вершина, и два ориентированных, концом которых является эта зеленая вершина. Количество ребер, инцидентных зеленой вершине, т.е. соединяющих её с другими вершинами, может превышать три, если ей смежны другие зеленые вершины. Двум зеленым вершинам инцидентны два кратных, т.е. инцидентных одной и той же паре вершин, ребра, направленные в противоположных направлениях.

3.3 Удаление из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам

Первой исполняемой функцией в рамках процесса формирования порядка заполнения указателей ночной расстановки составов на линии (Рисунок 3.1) является удаление из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам. Соответствующий алгоритм представлен на Рисунке 3.5.

Блоком 1 – отмечено начало алгоритма.

В блоке 2 – проверяется условие наличия в графе зеленые вершины. В случае, если они существуют, происходит переход к блоку 9, в ином случае – переход к блоку 4.

В блоках 3 – 8 организован цикл по ребрам, инцидентным желтой и зеленой вершинам одновременно, неориентированным или ориентированным, для которых зеленая вершина является началом.

В блоке 3 – начинается указанный цикл.

В блоке 4 – проверяется условие наличия рёбер, кратных выбранному. В случае, если они не существуют, происходит переход к блоку 5, в ином случае – переход к блоку 8.

В блоке 5 – из графа удаляется выбранное ребро, инцидентное желтой и зеленой вершинам одновременно.

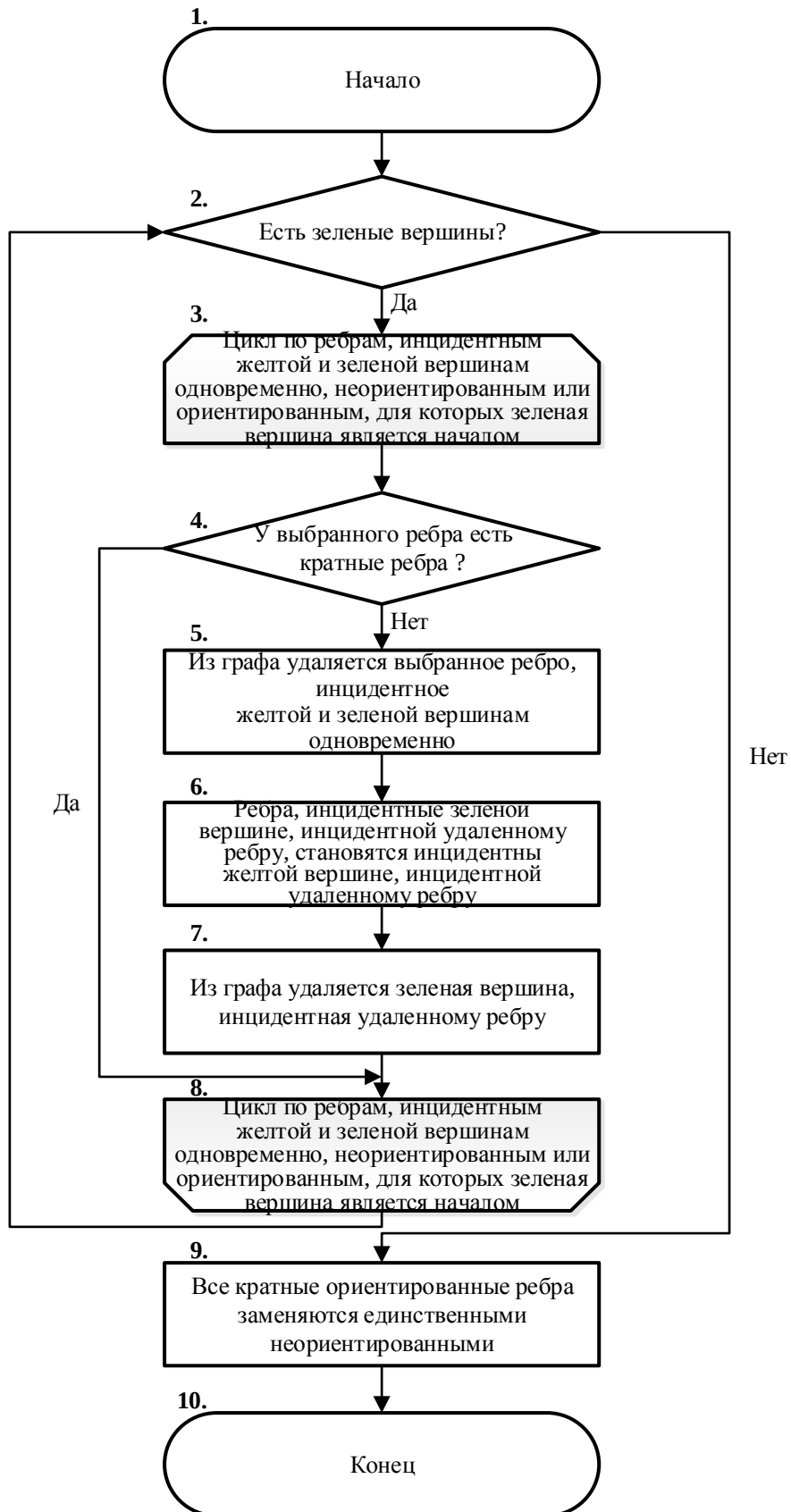


Рисунок 3.5 – Схема алгоритма удаления из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам

В блоке 6 – рёбра, инцидентные зеленой вершине, инцидентной удаленному ребру, становятся инцидентны желтой вершине, инцидентной удаленному ребру.

В блоке 7 – из графа удаляется зеленая вершина, инцидентная удаленному ребру.

В блоке 8 – завершается указанный цикл.

В блоке 9 – все кратные ориентированные ребра заменяются единственными неориентированными.

Блоком 10 – отмечено завершение алгоритма.

На рисунке 3.7 представлены графы, полученные на основе информации, визуализированной на Рисунке 3.4 в результате исполнения разработанного алгоритма.

3.4 Уплотнение графа и построение дерева

3.4.1 Общие положения

После удаления из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам, возможен выбор одной из следующих функций [89]:

- построение дерева;
- уплотнение графа с последующим разворачиванием «уплотненного» графа в дерево.

У результатов исполнения каждого из этих действий есть свои преимущества и недостатки, представленные в Таблице 3.1 и на Рисунке 3.6.

Таблица 3.1 – Преимущества и недостатки результатов преобразования графов расположения указателей ночной расстановки составов после удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам

Способ преобразования	Преимущества	Недостатки	Отличительные черты множества вершин	Отличительные черты множества ребер
Уплотнение графа	Сжатое представление информации	Необходимость дополнительной обработки информации при ее использовании в сценариях построения ПГД	Все вершины дерева, соответствующие одной вершине исходного графа, заменяются одной вершиной уплотненного графа	Все кратные одинаково направленные ребра дерева заменяются одним ребром уплотненного графа с тем же направлением
Построение дерева	Информация не требует дополнительной обработки при ее использовании в сценариях построения ПГД	Объемное представление информации	Каждой вершине уплотненного графа, имеющей разные пути, приведшие к ней от истока, соответствует отдельная вершина дерева	У каждой вершины дерева есть только одно входящее ребро, соответствующее единственному возможному пути от истока к вершине, и множество исходящих ребер, соответствующих всем ветвлениям пути

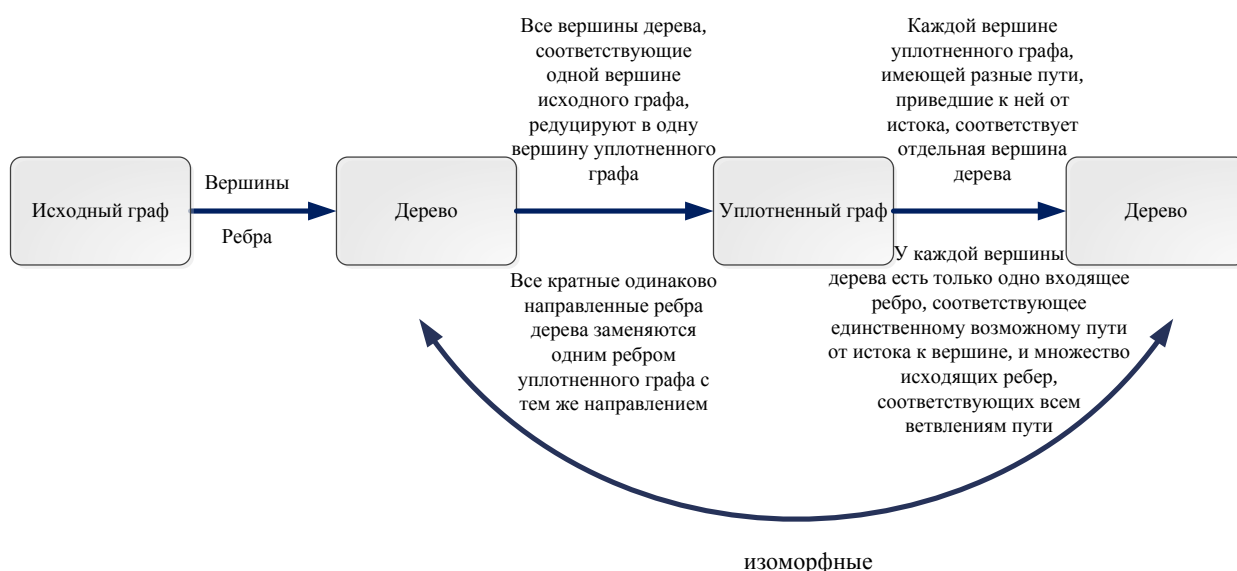


Рисунок 3.6 – Возможность получения из уплотненного графа дерева, содержащего все возможные последовательности заполнения или освобождения указателей ночной расстановки на станции

Разработанные автором алгоритмы уплотнения графов и построения деревьев являются комбинацией следующих алгоритмов [142] [143]:

- поиска в ширину (сначала посещаются вершины, которые расположены ближе к исходной вершине, а потом более дальние вершины);
- поиска в глубину (сначала выбирается вершина, смежная с текущей; если все смежные вершины уже посещены или у вершины нет смежных вершин, алгоритм возвращается на последнюю вершину, у которой есть непосещенные смежные вершины);
- топологической сортировке вершин графа с учетом всех возможных перестановок вершин и ряда ограничений, связанных с цветом вершин (это такое упорядочение его вершин, при котором если в графе присутствует ребро, начинающееся в вершине u и заканчивающееся в вершине v , то вершина u появляется до вершины v в упорядочении; это упорядочивание вершин графа вдоль вертикальной линии, при котором все рёбра направлены сверху вниз).

При реализации функций уплотнения графа и построения дерева множество цветов, используемых для раскрашивания вершин графа расширяется:

- серый цвет используется для раскрашивания вершин, которым соответствует вершина в «уплотненном» графе или построенном дереве;
- черный цвет используется для раскрашивания вершин, обладающих следующим свойством: самой вершине и всем смежным ей вершинам соответствуют вершины в «уплотненном» графе или построенном дереве.

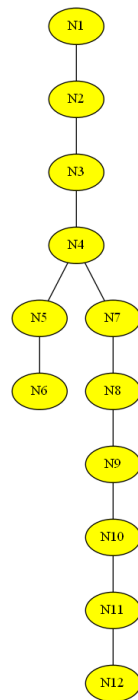


Рисунок 3.7.а – Результат преобразования схем организации ночной расстановки составов для двухстрелочной станции

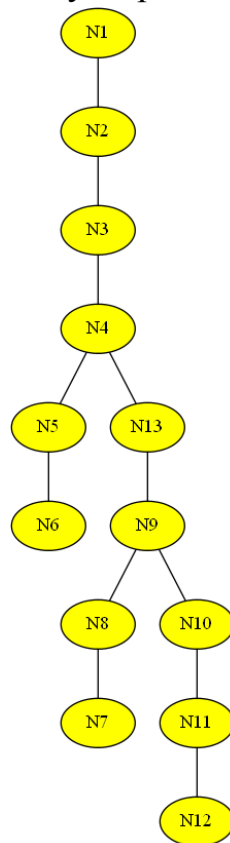


Рисунок 3.7.б – Результат преобразования схем организации ночной расстановки составов для трехстрелочной станции

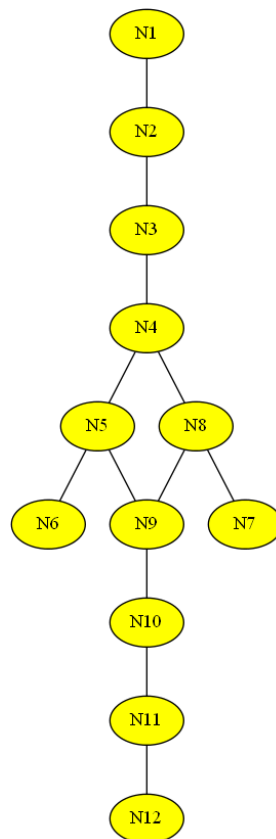


Рисунок 3.7.в – Результат преобразования схем организации ночной расстановки составов для четырехстрелочной станции

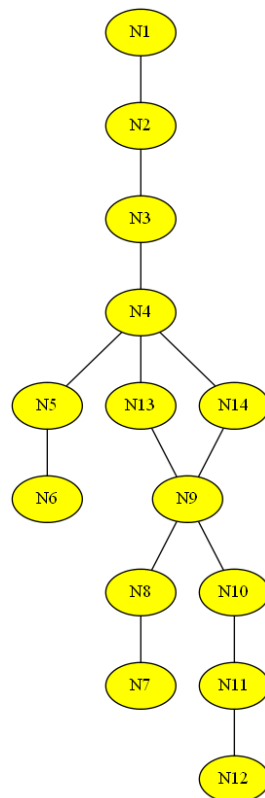


Рисунок 3.7.г – Результат преобразования схем организации ночной расстановки составов для шестистрелочной станции

3.4.2 Построение дерева

На Рисунке 3.8 представлен алгоритм построения дерева.

При первом вызове алгоритма в качестве текущей вершины рассматривается белая вершина графа, а запомненной вершины не существует.

Блоком 1 – отмечено начало алгоритма.

В блоке 2 – проверяется условие работы с текущей вершиной белого цвета. В случае, если текущая вершина белая, происходит переход к блоку 3, в ином случае – переход к блоку 4.

В блоке 3 – создается исток дерева.

В блоке 4 – добавляется в дерево вершина, соответствующая текущей вершине графа, как смежной к вершине, соответствующей запомненной вершине графа.

В блоке 5 – фиксируются параметры текущей итерации процесса с целью корректного их восстановления после возврата из рекурсивных процедур после достижения граничного условия построения дерева: сохранение информации о текущей серой вершине и текущей раскраске вершин.

В блоке 6 – раскрашивается текущая вершина в серый цвет.

В блоках 7 – 13 организован цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 7 – начинается цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 8 – проверяется условие наличия пары вершин, одна из которых желтая, а другая – текущая серая, инцидентных единственному ребру, при этом это ребро неориентированное или выходит из текущей вершины. В случае выполнения этого условия происходит переход к блоку 9, в ином случае – к блоку 12.

В блоках 9 – 11 организован цикл по всем желтым вершинам, соседним с текущей серой вершиной.

В блоке 9 – начинается цикл по желтым вершинам, соседним с текущей серой вершиной.

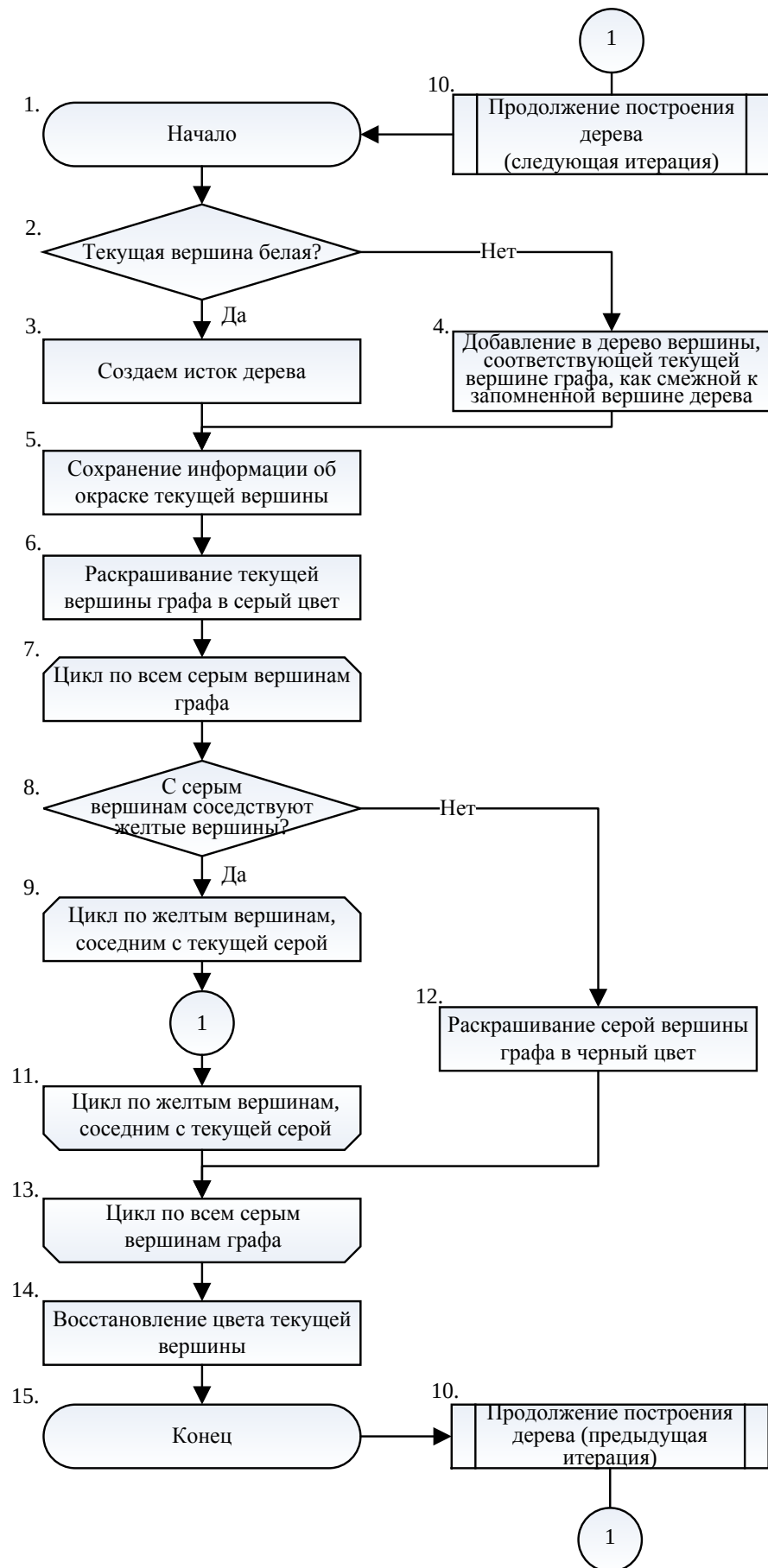


Рисунок 3.8 – Схема алгоритма построения дерева

В блоке 10 – происходит переход к следующему шагу построения дерева (блок 1). В качестве новой текущей вершины рассматривается текущая желтая вершина, в качестве запомненной вершины – текущая серая. Блок разбит на две части с целью обозначения дальнейшего пути выполнения действий в процессе возврата из рекурсивно вызванных процедур (переход от блока 15).

В блоке 11 – завершается цикл по всем желтым вершинам, соседним с текущей серой вершиной.

В блоке 12 – происходит раскрашивание серой вершин графа в черный цвет.

В блоке 13 – завершается цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 14 – происходит восстановление раскраски текущей вершины после возврата из рекурсивных процедур после достижения граничного условия построения дерева.

Блоком 15 – отмечено завершение алгоритма.

На Рисунке 3.9 представлены деревья, полученные на основе информации, визуализированной на Рисунке 3.7, в результате исполнения разработанного алгоритма. В названиях вершин построенного дерева последние две цифры совпадают с цифрами в названии соответствующей вершины в исходном графе. Цифры, расположенные левее, дают информацию о том, в какой последовательности добавлялись вершины в дерево, они соответствуют числу вершин в дереве к моменту добавления рассматриваемой вершины. Деревья, полученные для трех-, четырех- и шестистрелочной станций содержат большое количество вершин, поэтому они представлены в сильно уменьшенном виде, а также представлены их фрагменты.

Рисунок 3.9.a – Дерево, полученное на основе информации для двухстрелочной станции

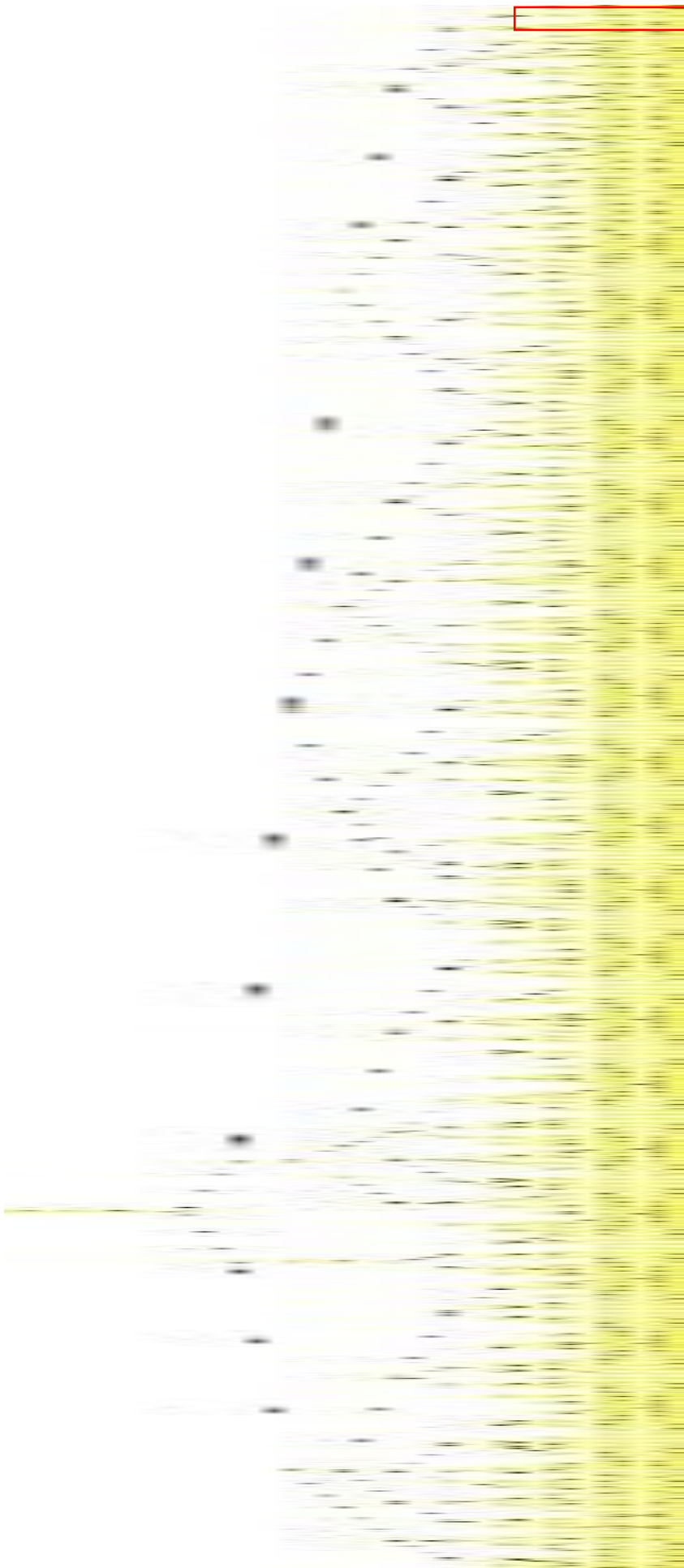


Рисунок 3.9.б – Дерево, полученное на основе информации для трехстрелочной станции

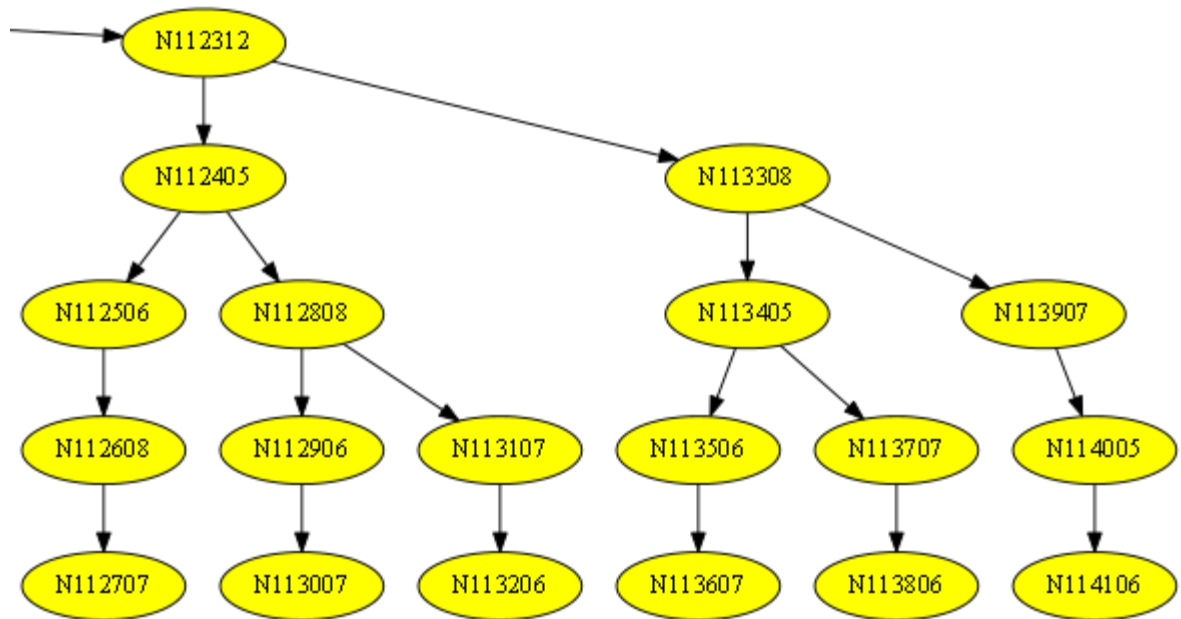


Рисунок 3.9.в – Фрагмент дерева, полученного для трехстрелочной станции



Рисунок 3.9.г – Дерево, полученное на основе информации для четырехстрелочной станции

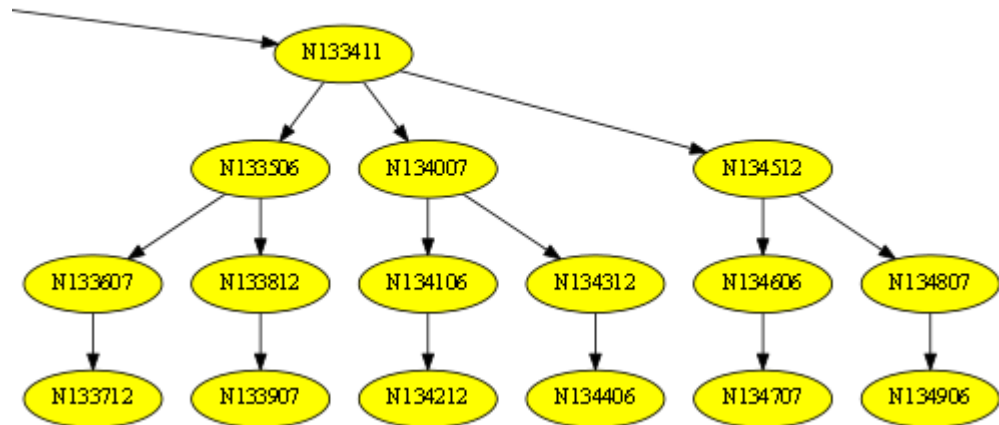


Рисунок 3.9.д – Фрагмент дерева, полученного для четырехстрелочной станции



Рисунок 3.9.е – Дерево, полученное на основе информации для шестистрелочной станции



Рисунок 3.9.ж – Фрагмент дерева, полученного для четырехстрелочной станции

3.4.3 Уплотнение графа

На Рисунке 3.10 представлен алгоритм уплотнения графа.

При первом вызове алгоритма в качестве текущей вершины рассматривается белая вершина графа, а запомненной вершины не существует.

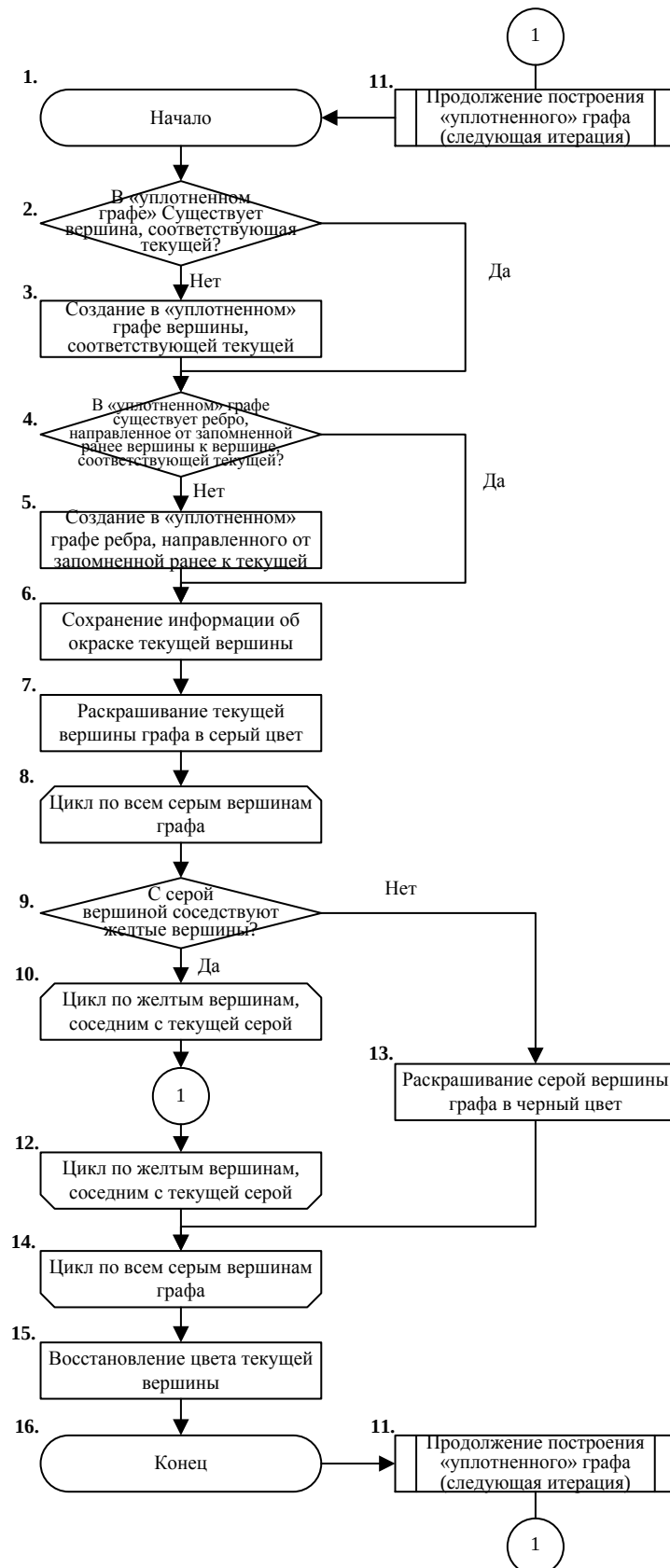
Блоком 1 – отмечено начало алгоритма.

В блоке 2 – проверяется условие наличия в «уплотненном» графе вершины, соответствующей текущей. В случае, если она не существует, происходит переход к блоку 3, в ином случае – переход к блоку 4.

В блоке 3 – происходит создание в «уплотненном» графе вершины, соответствующей текущей.

В блоке 4 – проверяется условие наличия в «уплотненном» графе ребра, направленного от запомненной ранее вершины к вершине, соответствующей текущей. В случае, если оно не существует, происходит переход к блоку 5, в ином случае – переход к блоку 6.

В блоке 5 – создается в «уплотненном» графе ребро, направленное от запомненной ранее вершины к вершине, соответствующей текущей.



Рисунке 3.10 – Схема алгоритма уплотнения графа

В блоке 6 – фиксируются параметры текущей итерации процесса с целью корректного их восстановления после возврата из рекурсивных процедур после достижения граничного условия построения «уплотненного» графа: сохранение информации об раскраске текущей вершины.

В блоке 7 – раскрашивается текущая вершина в серый цвет.

В блоках 8 – 15 организован цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 8 – начинается цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 9 – проверяется условие наличия в графе смежных серой вершине желтых вершин. Если такие вершины существуют, то происходит переход к блоку 10, в ином случае – переход к блоку 14.

В блоках 10 – 13 организован цикл по всем желтым вершинам, соседним с текущей серой вершиной.

В блоке 10 – начинается цикл по желтым вершинам, смежным текущей серой вершине.

В блоке 11 – происходит переход к следующему шагу построения «уплотненного» графа (блок 1). В качестве новой текущей вершины рассматривается текущая желтая вершина, в качестве запомненной вершины – текущая серая. Блок разбит на две части с целью обозначения дальнейшего пути выполнения действий в процессе возврата из рекурсивно вызванных процедур (переход от блока 16).

В блоке 12 – завершается цикл по всем желтым вершинам, соседним с текущей серой вершиной.

В блоке 13 – раскрашиваются серые вершины графа в черный цвет.

В блоке 14 – завершается цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 15 – восстанавливается раскраска текущей вершины после возврата из рекурсивных процедур после достижения граничного условия построения «уплотненного» графа.

Блоком 16 – отмечено завершение алгоритма.

На Рисунке 3.11 представлены «уплотненные» графы, полученные на основе информации, визуализированной на Рисунке 3.7, в результате исполнения разработанного алгоритма. На «уплотненных» графах красным цветом обозначены ребра, входящие в пути, соответствующие последовательности заполнения указателей ночной расстановки на фрагментах ПГД, представленных на Рисунке 3.3.

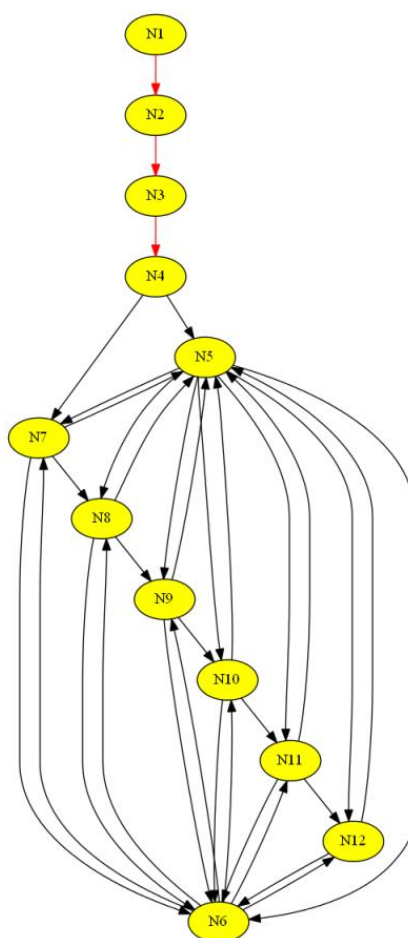


Рисунок 3.11.а – «Уплотненный» граф, полученный для двухстрелочной станции

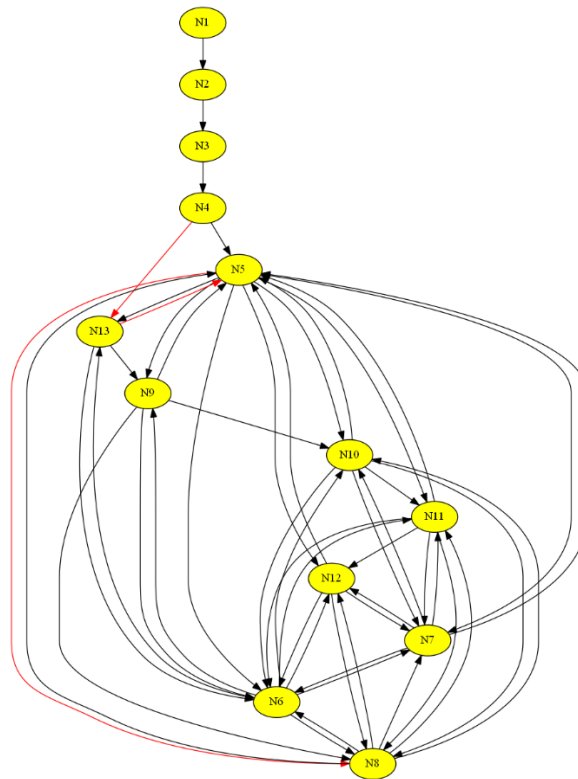


Рисунок 3.11.б – «Уплотненный» граф, полученный на основе информации для трехстрелочной станции

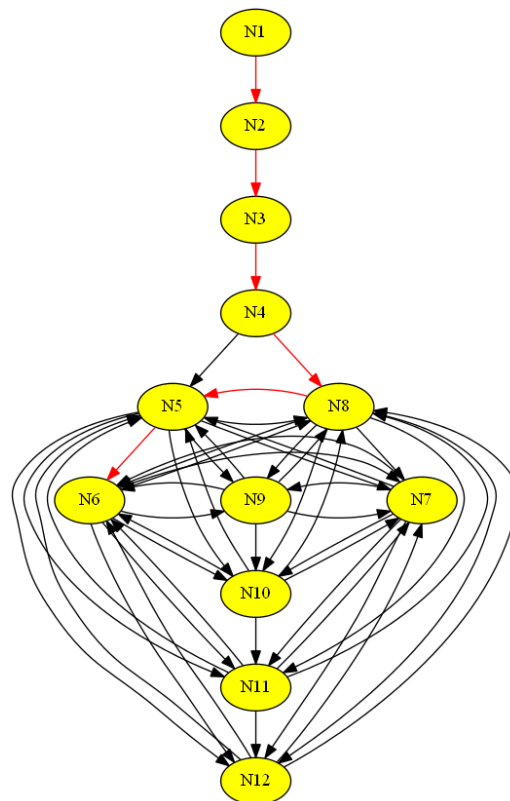


Рисунок 3.11.в – «Уплотненный» граф, полученный на основе информации для четырехстрелочной станции

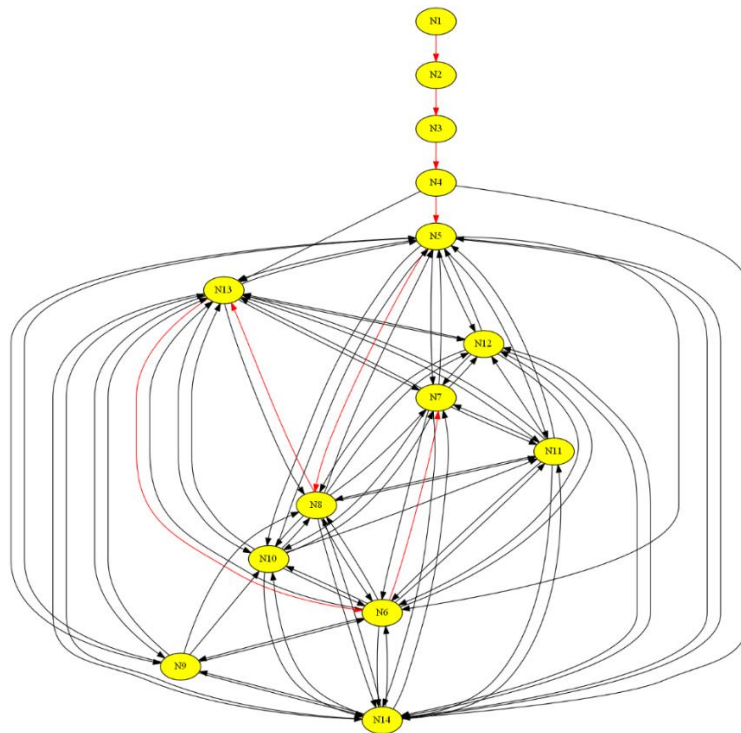


Рисунок 3.11.г – «Уплотненный» граф, полученный на основе информации для шестистрелочной станции

3.4.4 Алгоритм разворачивания «уплотненного» графа в дерево

На Рисунке 3.12 представлен алгоритм разворачивания «уплотненного» графа в дерево.

Как было показано в Таблице 2.1, при сжатом представлении информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов в виде уплотненных графов требуется её дополнительная обработка при использовании в сценариях построения ПГД.

Блоком 1 – отмечено начало алгоритма.

В блоке 2 –добавляется текущая вершина в путь.

В блоке 3 –сохраняется информация о цвете текущей вершины.

В блоке 4 –раскрашивается текущая вершина графа в серый цвет.

В блоках 5 – 12 организован цикл по всем серым вершинам графа.

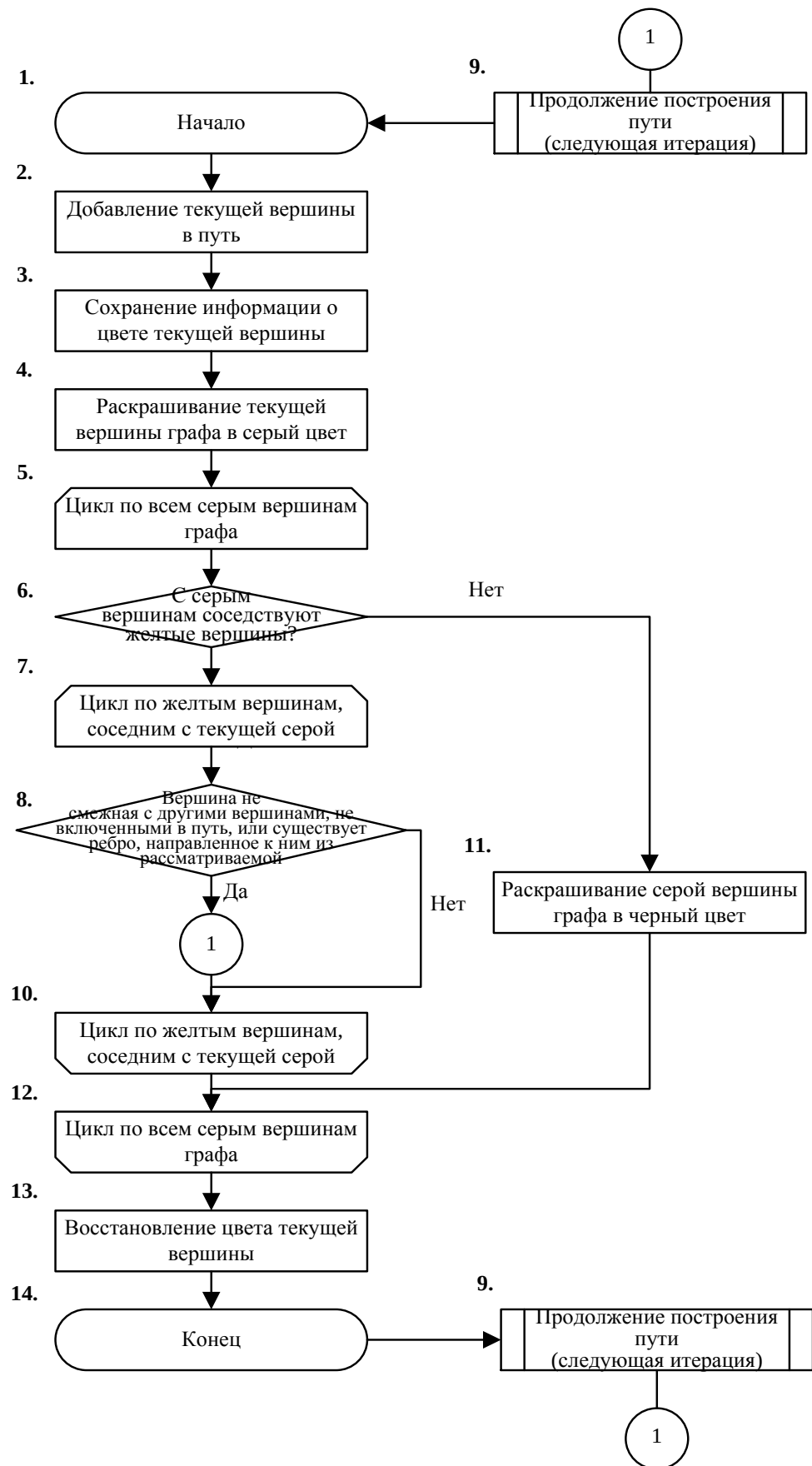


Рисунок 3.12 – Алгоритм разворачивания «уплотненного» графа в дерево

В блоке 5 – начинается цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 6 – проверяется условие наличия желтой вершины, соседней с текущей. В случае, если они существуют, происходит переход к блоку 7, в ином случае – переход к блоку 10.

В блоках 7 – 10 организован цикл по желтым вершинам, соседним с текущей серой.

В блоке 7 – начинается цикл по желтым вершинам, соседним с текущей серой.

В блоке 8 – проверяется следующее условие: вершина не является смежной с другими вершинами, не включенными в путь, или существует ребро, направленное к ним из рассматриваемой.

В блоке 9 – происходит переход к следующему шагу построения пути (блок 1). В качестве новой текущей вершины рассматривается текущая желтая вершина, в качестве запомненной вершины – текущая серая. Блок разбит на две части с целью обозначения дальнейшего пути выполнения действий в процессе возврата из рекурсивно вызванных процедур (переход от блока 14).

В блоке 10 – завершается цикл по желтым вершинам, соседним с текущей серой.

В блоке 11 – раскрашивается серая вершина графа в черный цвет.

В блоке 12 – завершается цикл по всем серым вершинам графа.

В блоке 13 – происходит восстановление после возврата из рекурсивных процедур после достижения граничного условия построения пути.

Блоком 14 – отмечено завершение алгоритма.

3.4.5 Сравнение результатов уплотнения графа и построения дерева

Параметры исходных и уплотненных графов, а также деревьев, соответствующих разным типам станций, приведена в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры исходных и уплотненных графов, а также деревьев, соответствующих разным типам станций

Типы станций	Исходный граф		Мощность множества ребер «уплотненного» графа	Дерево	
	Мощность множества ребер $ E $	Мощность множества вершин $ V $		Мощность множества ребер дерева	Мощность множества стоков дерева
2 стрелки	11	12	35	121	28
3 стрелки	12	13	52	1141	360
4 стрелки	12	12	50	1349	420
6 стрелок	14	14	82	35953	12600

Исходные графы являются разреженными. Для всех четырех типов станций $|E|$ гораздо меньше $|V|^2$, где $|E|$ – множество ребер графа, а $|V|$ – множество его вершин. В связи с этим при разработке программного и информационного обеспечения автоматизированной системы «АРМ Графиста–2.0» в качестве способа описания исходных графов выбраны списки смежных вершин – последовательности исходящих ребер для каждой вершины [142]. Такой способ описания более компактный в случае разреженных графов, чем использование матрицы смежности, и удобен для реализации функций визуализации графов.

Мощность множества вершин «уплотненного» графа совпадает с мощностью множества вершин исходного графа. Мощность множества ребер «уплотненного» графа превышает мощность множества ребер исходного графа в 3-5 раз.

Мощность множества вершин дерева превышает мощность множества его ребер на единицу. Каждая третья или четвертая вершина является стоком дерева. Количество стоков равно количеству возможных последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов. Мощность множества вершин дерева растёт с увеличением количества стрелочных переводов на станции. Мощность множества вершин дерева растёт с увеличением количества стрелочных переводов на станции и может превышать количество вершин исходного графа в 1000 раз. При переходе от двух стрелочных

переводов к трем или четырем мощности множеств, описывающих деревья, увеличиваются на порядок, а при переходе к шести стрелочным переводам – еще в 30 раз. Длина всех возможных путей от истока к стоку в построенных деревьях одна и та же, она меньше мощности множества вершин исходного графа на единицу.

Таким образом, результаты, приведенные в Таблице 3.2, иллюстрируют преимущество использования алгоритма уплотнения графа с последующим разворачиванием «уплотненного» графа в дерево по сравнению с прямым построением дерева.

В составе программного обеспечения системы «АРМ Графиста–2.0» автором реализованы:

- функции ввода информации об указателях ночной расстановки составов;
- функции ввода информации о размещении указателей ночной расстановки составов на путях линии;
- разработанные автором и входящие в состав процесса формирования информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов алгоритмы, схемы которых представлены на Рисунках 3.5, 3.8 и 3.10.

Результаты работы алгоритмов, представленные на Рисунках 3.4, 3.7, 3.9 и 3.11 получены в ходе работы системы «АРМ Графиста–2.0». Для визуализации результатов на Рисунках 3.7, 3.9 и 3.11 использован пакет утилит по автоматической визуализации графов *Graphviz* [144].

3.4.6 Использование матрицы смежности графа для уплотнения графа

Информация, представленная в форме графов, может быть представлена в форме таблиц [145]. В ходе диссертационного исследования разработан алгоритм, позволяющий преобразовать матрицу смежностей графа, полученного после

удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам, в матрицу смежностей «уплотненного» графа [146] [145]. На Рисунке 3.13 представлен соответствующий алгоритм.

Блоком 1 – отмечено начало алгоритма.

В блоке 2 – выбирается строка матрицы, которая соответствует истоку графа (т.е. столбец с тем же номером не содержит ни одной единицы).

В блоке 3 – формируется множества номеров непройденных строк матрицы.

В блоке 4 – проверяется условие наличия хотя бы одной единицы в строке. В случае, если в строке существует только одна единица, происходит переход к блоку 5, в ином случае – переход к блоку 7.

В блоке 5 – удаляется из множества номеров непройденных строк номера текущей строки.

В блоке 6 – выбирается переход к строке, номер которой равен номеру столбца, содержащему единицу в текущей строке.

В блоке 7 – составляется множество номеров столбцов, содержащих единицы в текущей строке.

В блоке 8 – составляется множество всех возможных размещений по 2 элемента этого множества [147].

В блоке 9 – Записывается единица в ячейки, положение которых определяется полученными наборами индексов. Единица записывается в ячейку с заданными индексами, если единица может быть записана и в ячейку с поменянными местами индексами. Т.е. если исходно ячейка с индексами i, j содержала единицу, а ячейка с индексами j, i ее не содержала, то мы содержимое этой ячейки и не изменяем.

В блоках 10 – 12 организован цикл по строкам, номера которых равны номерам столбцов, содержащих единицы в текущей строке.

В блоке 11 – происходит переход к следующему шагу (блок 1) и продолжается просмотр строк.

В блоке 12 – завершается цикл по строкам, номера которых равны номерам столбцов, содержащих единицы в текущей строке.

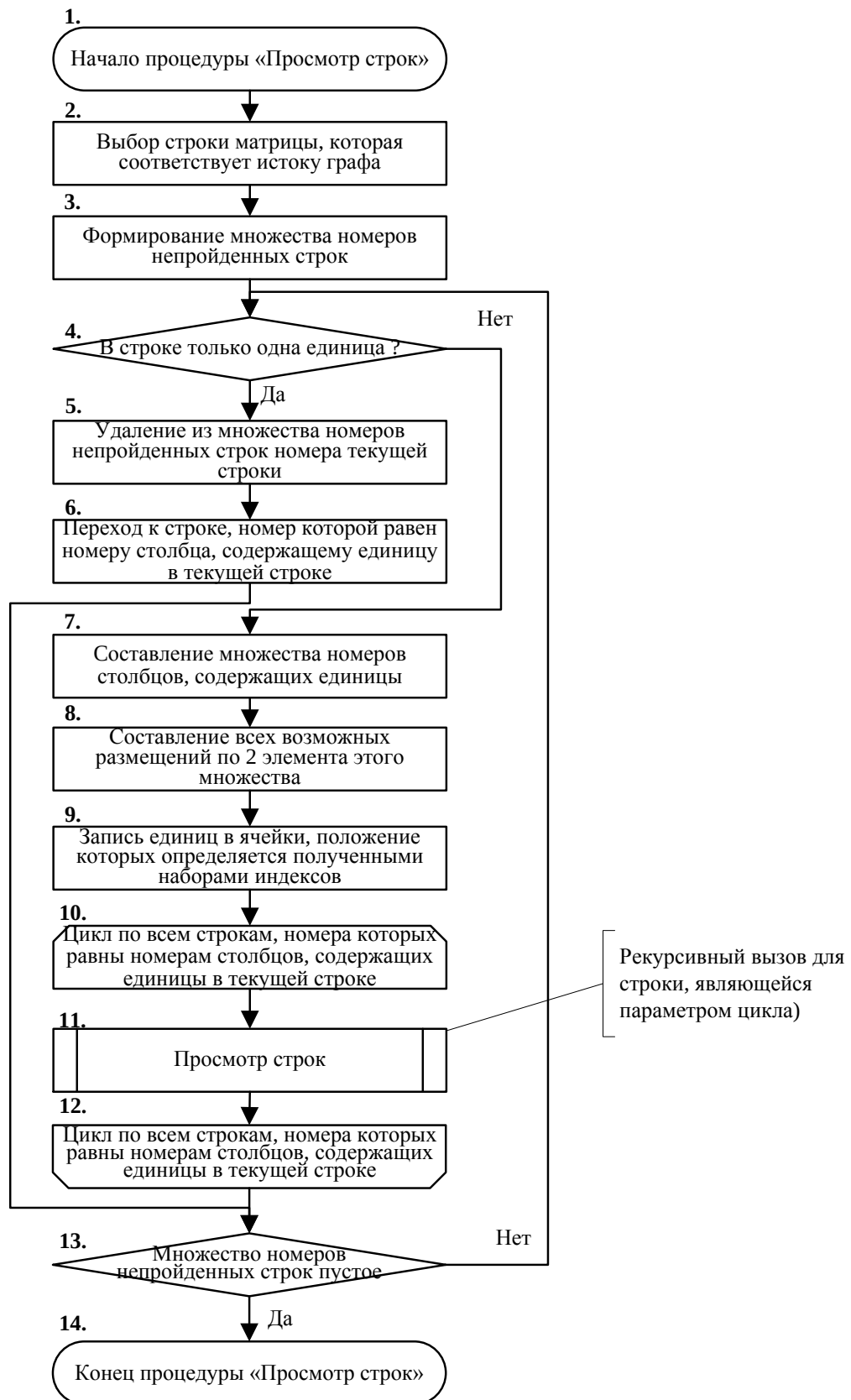


Рисунок 3.13 – Алгоритм преобразования матрицы смежностей графа

В блоке 13 – проверяется условие того, что множество номеров непройденных строк пустое. В случае, если оно пустое, происходит переход к блоку 14, в ином случае – переход к блоку 4.

Блоком 14 – отмечено завершение алгоритма.

На Рисунках 3.14 и 3.15 представлены исходные данные и результаты построения «уплотненного» графа для одного из типов станций, существующих на Московском метрополитене. Исходный граф, полученный после удаления из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам, является подграфом уплотненного. Ребра, добавленные в граф в ходе перехода от исходного графа к уплотненному, выделены пунктиром.

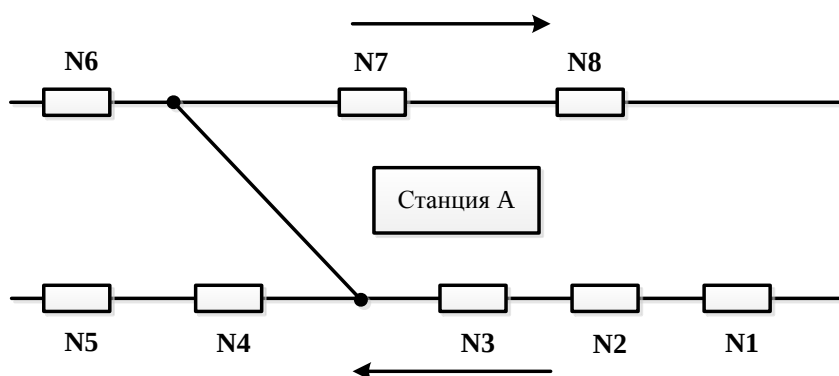


Рисунок 3.14 – Схема организации ночной расстановки составов на станции

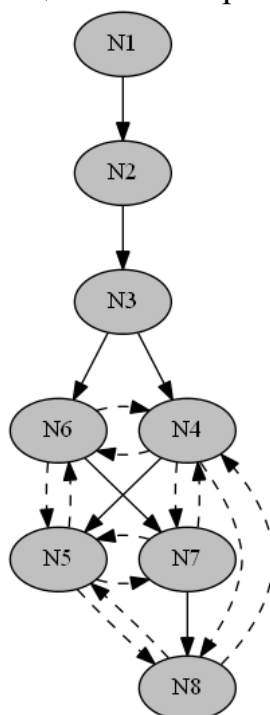


Рисунок 3.15 – «Уплотненный» граф последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов

В таблицах 3.3 и 3.4 представлены исходная и результирующая матрицы смежности, соответствующие графам, представленным на Рисунках 3.14 и 3.15 («уплотненный» граф) для двухстрелочной станции, существующих на Московском метрополитене. Информация на Рисунках 3.11, 3.15 и в Таблице 3.3 подтверждают совпадение результатов, полученных при матричном и графическом представлении информации.

Таблица 3.3 – Матрица смежностей графа, полученного после удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам

0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3.4 – Матрица смежностей «уплотненного» графа

0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	1	1	0	0	1
0	0	0	1	1	0	0	0

Основные выводы и результаты по главе

1. Разработаны алгоритмы, выполняемые в ходе процесса формирования информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов.
2. Реализован алгоритм восстановления дерева из «уплотненного» графа, который позволяет получить тот же набор последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов.
3. Реализована возможность использования двух форм (матричной и графической) представления информации о графовых объектах для автоматизации построения ПГД и ГО. Показано совпадение полученных результатов.
4. Выполнена автоматизация процесса формирования информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки в рамках системы «АРМ Графиста–2.0.».
5. Показано соответствие результатов работы созданных алгоритмов данным реальных ПГД.

4. ПОСТРОЕНИЕ ПРОТОТИПА ГО

4.1 Постановка задачи

В процессе автоматизированного построения ПГД и ГО первым подпроцессом, реализующим преобразование данных, является подпроцесс построения прототипа ГО.

Весь период эксплуатации ЭПС может рассматриваться как совокупность интервалов времени между моментами выхода состава из депо и захода обратно в соответствии с требованиями ПГД. Подразумевается, что в депо всегда проводится обслуживание.

В некоторых случаях продолжительность нахождения состава вне депо в движении может превышать допустимый интервал времени между двумя техническими обслуживаниями (ремонтами или осмотрами ЭПС) (ТО). В этом случае возникает задача выбора времени и места проведения ТО дополнительными силами и средствами (возможно, вне депо).

Задача построения ГО в этом случае может быть формализована следующим образом. При заданном ПГД (моментах выхода составов из депо и захода обратно), ресурсах проведения ТО (заданы перечень мест проведения обслуживаний и их режим работы) и ограничении сверху на допустимый интервал времени между двумя ТО требуется составить ГО таким образом, чтобы минимизировать количество выполненных обслуживаний и распределить их максимально равномерно.

Организация ГО ЭПС является сложной и важной задачей. Она обладает рядом особенностей, которые позволяют говорить о наличии ограниченных ресурсов для ее решения [148]:

- напряженный график работы ЭПС, полное использование всего наличного ЭПС в часы пик;

– ограниченные возможности на расширение площадей депо в рамках мегаполисов [149], [150] в связи с высокой стоимостью земли и степенью застройки;

– ограниченные возможности на использование линейных пунктов технического осмотра (ПТО), расположенных на станционных путях станций в связи с использованием этих путей для регулировочных действий (оборотов и отстоев) как в соответствии с ПГД, так и в сбойных ситуациях [96] [23];

– распределение ПТО и маршрутов между депо.

Для выбора рационального варианта реализации ГО ЭПС с точки зрения равномерного распределения ТО необходимо выбрать критерий оценки, идентичный описанным в работах [53].

В работах [53] [151] авторы в качестве критерия рационального планирования ГО ЭПС ввели критерий равномерности размещения обслуживаний R_R , определяемый одним из двух способов:

– как сумма квадратов отклонений времен начала обслуживания для кандидата, используемого для проведения обслуживания, от желаемых времен начала проведения обслуживания:

$$R_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{c_i:N_r} (\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: t_{des} - \mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: \mathbf{k}: t_b)^2}{N_{\Sigma r} - 1} \rightarrow \min \quad (4.1)$$

где $\mathbf{c}$ – это кортеж, называемый «цепочка» и описывающий поведение состава с момента его выхода из депо до момента захода состава в депо;

$\mathbf{c}_i: N_r$ – необходимое количество обслуживаний внутри цепочки;

N_C – количество цепочек;

$\mathbf{l}$ – это кортеж, называемый «звено» и описывающий поведение состава с момента его выхода из депо до момента захода на ТО, с момента выхода из ТО до момента захода в депо или между двумя ТО;

$\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: t_{des}$ – желаемое время начала проведения ТО, которое следует за звеном $\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j$ – время начала обслуживания, при выполнении которого все обслуживания внутри цепочки отстоят один от другого на одинаковые промежутки времени;

$\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: \mathbf{k}$ – это кортеж, называемый «кандидат» и описывающий ресурсы, используемые для проведения обслуживания, соответствующего звену $\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j$;

$\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: \mathbf{k}: t_b$ – время начала обслуживания для кандидата $\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: \mathbf{k}$;

$N_{\Sigma r}$ – сумма необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек.

– как сумма квадратов интервалов времени между обслуживаниями

$$R_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{c_i: N_r - 1} z_{ij}^2}{N_{\Sigma r} + N_C - 1} \rightarrow \min \quad (4.2)$$

где,

$$z_{ij} = \begin{cases} \mathbf{c}_i: \mathbf{l}_1: \mathbf{k}: t_b - \mathbf{c}_i: t_b, & \text{если } j = 1 \\ \mathbf{c}_i: \mathbf{l}_j: \mathbf{k}: t_b - (\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_{j-1}: \mathbf{k}: t + \mathbf{r}: D), & \text{если } j = 2 \dots \mathbf{c}_i: N_r \\ \mathbf{c}_i: t_e - (\mathbf{c}_i: \mathbf{l}_{c_i: N_r}: \mathbf{k}: t_b + \mathbf{r}: D), & \text{если } j = \mathbf{c}_i: N_r + 1 \end{cases}$$

$\mathbf{r}$ – кортеж, называемый «ремонт» и описывающий ТО;

$\mathbf{r}: D$ – продолжительность обслуживания;

$\mathbf{c}_i: t_b$ – момент выхода состава из депо;

$\mathbf{c}_i: t_e$ – момент захода состава в депо.

Использование критериев (4.1) и (4.2) предполагает, что для каждого из задействованных в ГО кандидатов и для каждого звена выполняются ограничения на выбор места проведения ТО и периодичность проведения ТО:

$$z_{ij} \leq \mathbf{r}: P, i = 1 \dots N_C, j = 1 \dots \mathbf{c}_i: N_r \quad (4.3)$$

где $\mathbf{r} : P$ – допустимый интервал времени между двумя обслуживаниями.

В противном случае значение критерия R_R назначается равным "функции штрафа", имеющей значение, значительно превышающее $\mathbf{r} : P \times N_{\Sigma r}$, где $N_{\Sigma r} = \sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c}_i : N_r$ – сумма необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек.

Особенностью задачи построения ГО ЭПС, не позволяющей применить для ее решения классические методы решения задачи о назначениях, например, Венгерский алгоритм [152], является зависимость параметров окна возможностей не первого после выхода состава из депо ТО от того, какие кандидаты были использованы для проведения предшествующих ТО. Это иллюстрируют Рисунки 4.1-4.4.

На Рисунке 4.1 представлены времена проведения ТО для всех кандидатов. Для проведения ТО используется два линейных пункта технического осмотра (ПТО) с равными возможностями и графиками работы. В каждом из ПТО в течение дня можно проводить по 19 ТО. На всех графиках оси времени оцифрованы в условных единицах.

На Рисунке 4.2 представлены результаты предварительного расчета окон возможностей для всех ТО, которые необходимо провести. Девятое и десятое ТО ($k = 9$ и $k = 10$) не разделены заходом в депо, следовательно после назначения кандидата для проведения девятого ТО ($k = 9$) окно возможностей проведения десятого ТО ($k = 10$) может измениться.

По информации, имеющейся на Рисунках 4.1 и 4.2, можно определить, что в исходные окна возможностей девятого и десятого ТО попадают следующие кандидаты:

- для $k = 9$ подходят 1-3 и 13-19 кандидаты, относящиеся к первому ПТО, и 20-22 и 32-38 кандидаты, относящиеся ко второму ПТО;
- для $k = 10$ подходят 1-6 и 17-19 кандидаты, относящиеся к первому ПТО, и 20-25 и 36-38 кандидаты, относящиеся ко второму ПТО.

На Рисунке 4.3 представлены результаты расчета функции $f(x_k)$, отражающей возможность и рациональность использования кандидата x_k для проведения k -го ТО с точки зрения равномерности, для $k = 9$. Это первое после выхода состава из депо ТО, поэтому зависимости возможности назначения кандидата для его проведения от кандидатов, которые были использованы для проведения предшествующих ТО, нет.

На Рисунках 4.3-4.4 красным цветом отмечены те кандидаты, использование которых недопустимо. Внутри прямоугольников с зеленым контуром находятся те кандидаты, которые соответствуют исходным окнам возможностей ТО.

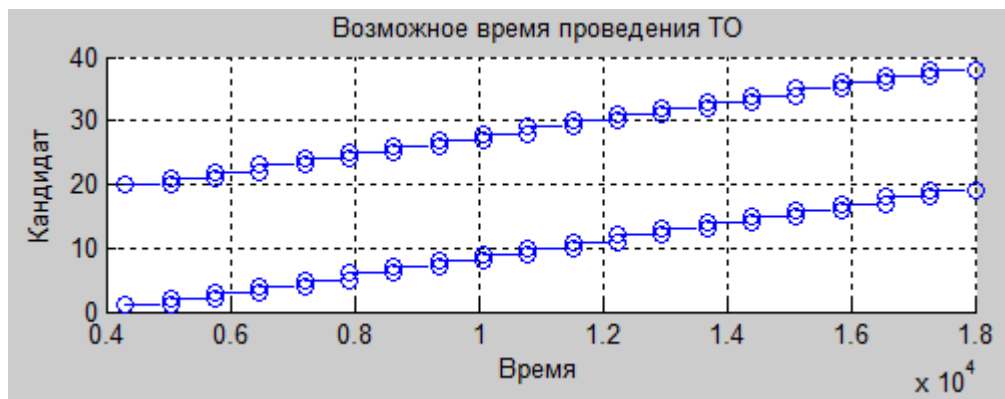


Рисунок 4.1 – Времена проведения ТО для всех кандидатов

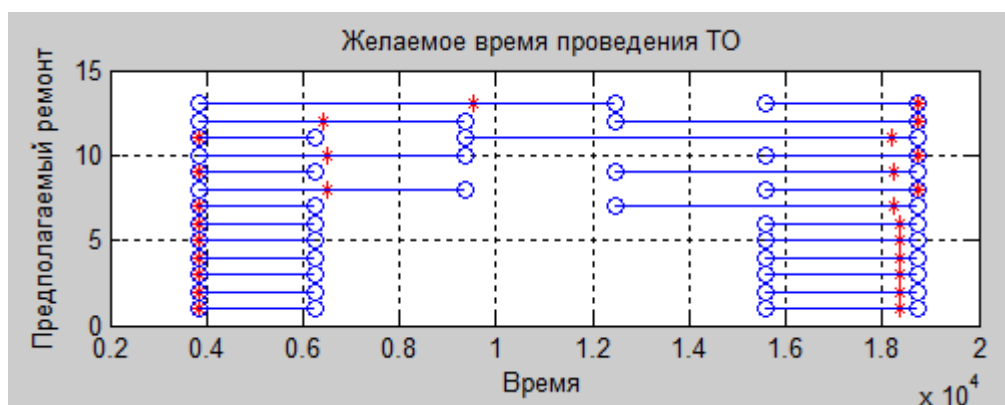


Рисунок 4.2 – Результаты предварительного расчета окон возможностей для всех
ТО

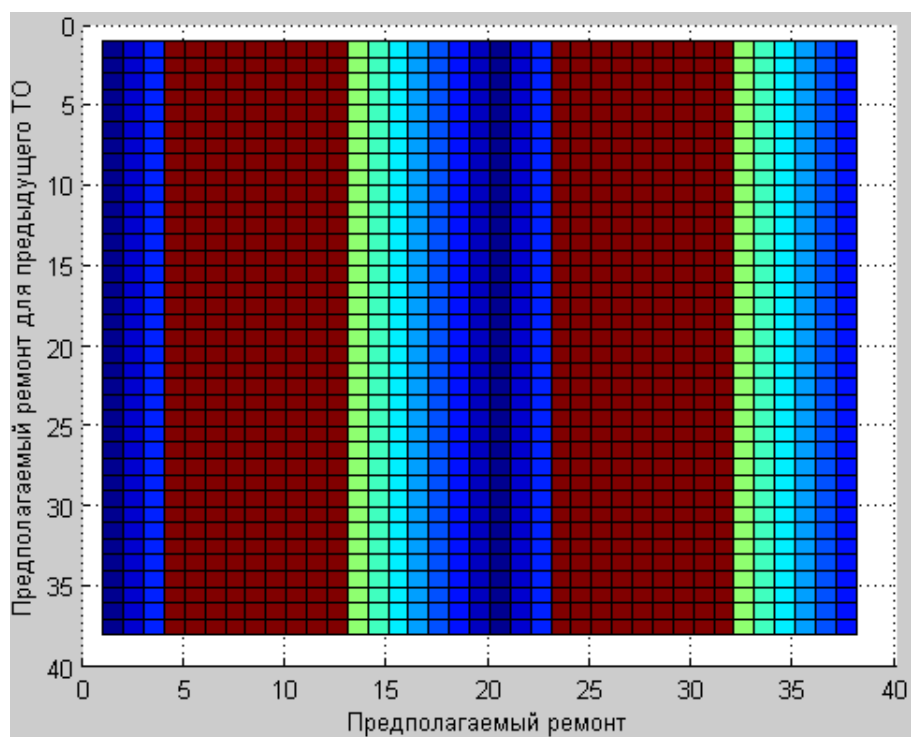


Рисунок 4.3 – Результаты расчета функции $f(x_k)$, отражающей возможность и рациональность использования кандидата x_k для проведения -го ТО с точки зрения равномерности, для $k = 9$

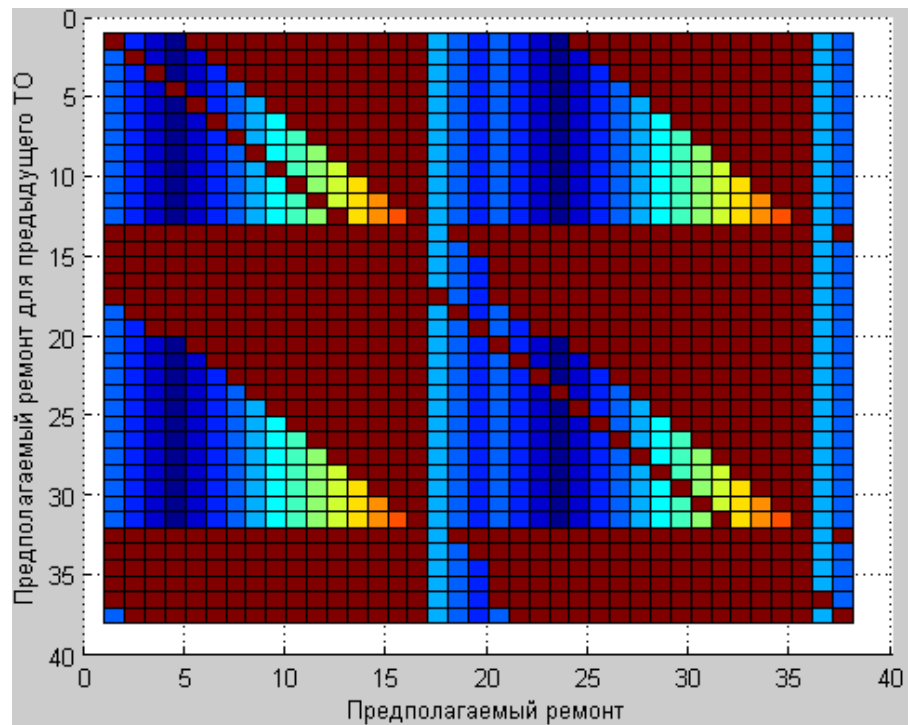


Рисунок 4.4 – Результаты расчета функции $f(x_k)$, отражающей возможность и рациональность использования кандидата x_k для проведения k -го ТО с точки зрения равномерности, для $k = 10$

На Рисунке 4.4 представлены результаты расчета функции $f(x_k)$, отражающей возможность и рациональность использования кандидата x_k для проведения k -го ТО с точки зрения равномерности, для $k = 10$. Это второй после выхода состава из депо ТО, поэтому присутствует зависимость возможности назначения кандидата для его проведения от кандидатов, которые были использованы для проведения предшествующих ТО. Из представленного графика видно, что наличие такой связи не влияет на количество возможностей для проведения ТО, а лишь перераспределяет их.

Необходимым условием наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС является превышение количества кандидатов N_k над суммой необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек $N_{\Sigma r}$ или равенство этих величин:

$$N_k \geq N_{\Sigma r} \quad (4.4)$$

В случае невыполнения необходимого условия наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС (4.4), а это и есть ситуация наличия ограниченных ресурсов для реализации требований проведения ТО, в качестве критерия выбора варианта реализации ГО ЭПС R_E может выступать суммарное превышение времени между ремонтами над $r: P$:

$$R_E = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{c_i: N_{rr}+1} \begin{cases} z_{ij} - r: P, & \text{если } z_{ij} > r: P \\ 0, & \text{если } z_{ij} \leq r: P \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_C} c_i: N_{rr} + N_C - 1} \quad (4.5)$$

где $c_i: N_{rr}$ – реализованное количество обслуживаний внутри цепочки.

Значение критерия (4.5) не отражает того факта, что превышение времени между ремонтами над допустимым интервалом времени между двумя обслуживаниями $r: P$ может распределяться по-разному при одинаковой общей продолжительности. Если значимым является разделение этого времени на

непродолжительные интервалы, то имеет смысл рассматривать квадратичный критерий:

$$R_E = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=0}^{c_i:N_{rr}} \begin{cases} (z_{ij} - r:P)^2, & \text{если } z_{ij} > r:P \\ 0, & \text{если } z_{ij} \leq r:P \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_C} c_i:N_{rr} + N_C - 1} \quad (4.6)$$

Введение нового критерия выбора рационального ГО ЭПС предполагает модификацию синтезированных ранее алгоритмов [53] [151].

В статье [53] разработан рекурсивный алгоритм, который реализует решение задачи методом полного перебора. Выбор из полученного множества назначений оптимального с точки зрения критерия (4.1) выполняется на базе аппарата дискретного варианта динамического программирования Беллмана [129]. В результате выполнения этого алгоритма получается ориентированный граф вариантов ГО ЭПС. Успешно построенному варианту ГО ЭПС в графе соответствует путь от истока до одного из стоков длиной $N_{\Sigma r}$.

При использовании критериев (4.5) или (4.6) условие, накладываемое на длину пути от истока до одного из стоков для успешно построенного варианта ГО ЭПС, перестает быть обязательным. Если реализованное количество обслуживаний внутри цепочки меньше необходимого:

$$c_i:N_{rr} < c_i:N_r,$$

то в пути, соответствующем успешно построенному варианту ГО ЭПС, на некоторых уровнях могут отсутствовать вершины и длина пути будет меньше $N_{\Sigma r}$.

Одновременно на каждом из уровней графа может увеличиться число вершин, так как использование критериев (4.5) или (4.6) предполагает, что для каждого из задействованных в ГО ЭПС кандидатов и для каждого звена выполняются ограничение на выбор места проведения ТО, однако требование на

периодичность проведения ТО (4.3) перестает быть обязательным, что расширяет множество рассматриваемых вариантов назначений.

Таким образом, задача построения прототипа ГО ЭПС формулируется следующим образом. Найти способ организации ГО ЭПС, обеспечивающий минимум выбранного критерия оптимальности (выбор осуществляется из вариантов, описанных формулами (4.1), (4.2), (4.5), (4.6) с учетом выполнения ограничений (4.3) и (4.4)) для просмотренного множества вариантов организации ГО ЭПС, при условии, что весь ЭПС осуществляет движение по одной и той же линии метрополитена и имеет равные условия для проведения ТО.

4.2 Построение прототипа ГО с использованием генетического алгоритма

4.2.1 Общая схема генетического алгоритма

На Рисунке 4.5 представлена укрупненная схема ГА, решающего задачу построения прототипа ГО.

Блоком 1 – отмечено начало алгоритма.

В блоке 2 – происходит инициализация исходных данных для работы алгоритма, которая включает в себя следующие действия [148]:

– загрузка описания хромосомы. Если необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС (4.4) выполняется и фитнес-функция в виде (4.1) или (4.2) отражает равномерность размещения ТО, то в качестве множества аллелей выступает множество кандидатов, доступных для исполнения ТО. Если необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС (4.4) не выполняется и фитнес-функция (4.5) или (4.6) отражает превышение времени между ремонтами над допустимым интервалом



Рисунок 4.5 – Схема ГА

времени между двумя обслуживаниями $r:P$, то в качестве множества аллелей выступает расширенное множество кандидатов, мощность которого доведена до значения суммы необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек $N_{\Sigma r}$ путем включения в состав множества «мнимых» ремонтов в количестве $N_{\Sigma r} - N_k$. При построении прототипа ПГД предполагается, что составы находятся в движении с момента подачи напряжения на контактный рельс и до момента окончания движения по линии. При построении ПГД превышение времени между ремонтами над допустимым запрещено. Если в прототипе ГО, полученном для случая наличия ограниченных ресурсов, то есть при невыполнении необходимого условия построения ГО, есть такое превышение, то при построении ПГД необходимо это учесть, то есть уменьшить время в движении между двумя осмотрами путем ввода дополнительного отстоя, раннего ухода на ночную расстановку или более позднего выхода из нее. Размещение «мнимого» осмотра в локусе, соответствующем некоторой цепочке, приводит к уменьшению на единицу реализованного количества обслуживаний внутри цепочки $c:N_{rr}$, которое по умолчанию равно необходимому количеству обслуживаний внутри цепочки $c:N_r$, и объединению звена, в котором размещен мнимый осмотр со следующим, то есть уменьшению количества звеньев в составе цепочки на единицу [153]. Эта информация обобщена в Таблицах 4.1 и 4.2;

- загрузка данных для вычисления значения фитнес-функции;
- настройка параметров работы алгоритма (способа кроссинговера, размера популяции, максимального количества поколений без улучшений значений фитнес-функции, точности определения значения фитнес-функции, максимального времени работы алгоритма и др.).

В блоке 3 – случайным образом генерируется первое поколение популяции.

В блоке 4 – производится вычисление значения фитнес-функции для каждой хромосомы.

В блоках 5-7 – происходит формирование нового поколения, моделируется

процесс эволюции, который начался из популяции случайно сгенерированных особей в блоке 3. Эволюция представляет собой итеративный процесс, на каждом шаге которого формируется новая популяция из следующих составляющих:

- особи с наилучшими значениями фитнес-функции, входящие в состав текущей популяции (блок 5);
- особи, полученные в результате кроссинговера особей, выбранных в качестве родителей из состава текущей популяции (блок 6);
- особи, полученные в результате мутаций особей, выбранных в качестве родителей из состава текущей популяции (блок 7).

Таблица 4.1 – Адаптация терминов ГА применительно к решаемой задаче

Термин, заимствованный из генетики	Аналогичный термин из решаемой задачи
Популяция, поколение	множество вариантов построения ГО, рассматриваемое на итерации эволюции
Особь	совпадает с хромосомой, так как особь описывается одной хромосомой
Хромосома	вариант построения ГО, в котором каждому ремонту, который должен быть выполнен, поставлен в соответствие кандидат, который задает место и время его проведения
Ген	кандидат, назначенный для выполнения ремонта
Генотип	хромосома представляет собой упорядоченное по выполняемым ремонтам множество кандидатов, используемых для реализации этих ремонтов
Локус	один из ремонтов, который должен быть выполнен и задает один элемент хромосомы
Аллель	один из кандидатов, которые могут быть назначены для выполнения ремонта
Фитнес-функция	целевая функция, описываемая одним из выражений (4.1), (4.2), (4.5) или (4.6)
Мутация	изменение номера кандидата, который назначен для выполнения ремонта, происходящее под влиянием внешней или внутренней среды.
Кроссинговер	изменение номера кандидата, который назначен для выполнения ремонта, происходящее в результате обмена генетическим материалом между особями популяции
Эволюция	процесс изменения множества рассматриваемых вариантов построения ГО

Таблица 4.2 – Определение множества аллелей

Необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС	Фитнес-функция	Множество аллелей	Мощность множества аллелей	Длина хромосомы
выполняется	равномерность проведения обслуживаний	множество кандидатов, доступных для исполнения обслуживаний	N_k	$N_{\Sigma r}$
не выполняется	превышение времени между ремонтами над допустимым интервалом времени между двумя обслуживаниям и	расширенное множество кандидатов, мощность которого доведена до значения суммы необходимых количеств обслуживаний путем включения в состав множества «мнимых» ремонтов в количестве $N_{\Sigma r} - N_k$.	$N_{\Sigma r}$	$N_{\Sigma r}$

В блоке 5 – происходит упорядочивание популяции в порядке увеличения значений фитнес-функции и формирование множества родителей, которые участвуют в процессе кроссинговера и мутаций и начинается формирование нового поколения путем включения в него особей с наилучшими значениями фитнес-функции. Чем лучше значение фитнес-функции, тем у особи выше шанс быть выбранным в качестве родителя будущего поколения.

В блоке 6 – дополняется новое поколение путем кроссинговера в соответствии с выбранным алгоритмом. Если ни один кроссинговер не был выполнен, потомство является точной копией родителей.

В блоке 7 – дополняется новое поколение путем мутаций в соответствии с выбранным алгоритмом.

В блоке 8 – проверяется условие окончания работы алгоритма. В случае, если условие окончания выполняется, происходит переход к блоку 9, а ином случае – к блоку 4.

В блоке 9 – выполняется визуализация результатов работы алгоритма.

Блоком 10 – отмечено завершение алгоритма.

4.2.2 Определение размера первичной популяции

Процесс настройки параметров работы ГА, описанного в п. 4.2.1, включает в себя задание размера популяции, который определяет, сколько особей присутствует в каждом поколении. Этот параметр, наряду с другими параметрами алгоритма, как будет показано в п. 4.2, оказывает влияние на его работу. При большом размере популяции ГА осуществляет поиск в пространстве решений более тщательно, уменьшая вероятность того, что будет найден лишь локальный, а не глобальный минимум. Вместе с тем, большой размер популяции приводит к тому, что алгоритм работать медленнее.

Размер популяции может находиться в пределах $\left[1, \frac{N_a!}{(N_a - N_c)!}\right]$, где N_a – мощность множества аллелей, N_c – длина хромосомы.

Размер популяции $\frac{N_a!}{(N_a - N_c)!}$, определяемый формулой числа размещений N_a аллелей по N_c локусам – предельный случай, при котором ГА вырождается в алгоритм полного перебора; а размер популяции 1 – вырожденный случай (случайный выбор любого значения и волюнтаристским образом объявление его оптимальным).

Пусть размер популяции равен N . Наша цель – найти оптимальное значение из полного множества хромосом, поэтому набор хромосом должен содержать все значения, необходимые для того, чтобы путем их рекомбинации можно было

получить любой из элементов полного множества. Для этого размер популяции должен быть таким, чтобы для каждого локуса во всей популяции были представлены все возможные значения аллелей.

Рассчитаем вероятность того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе. Вероятность того, что какой-либо один из локусов будет во всех хромосомах содержать одно и то же значение, равна $\frac{1}{(N_a)^N}$. В популяции полный набор аллелей в одном из локусов может присутствовать в случае, если $N \geq N_a$. При этом в N_a хромосомах значения различаются, а в оставшихся принимают произвольные значения. Число реализаций заполнения одноименного локуса в популяции, в которых хромосомы будут содержать все возможные значения аллелей, в выбранном локусе, определяется следующим выражением:

$$\bar{C}_{N_a}^{N-N_a} = C_{N_a+N-N_a-1}^{N-N_a} = C_{N-1}^{N-N_a} = \frac{(N-1)!}{(N-N_a)!(N-1-N+N_a)!} = \frac{(N-1)!}{(N-N_a)!(N_a-1)!},$$

где $\bar{C}_{N_a}^{N-N_a} = C_{N_a+N-N_a-1}^{N-N_a}$ – число сочетаний с повторениями N_a аллелей в одном и том же локусе всех оставшихся после заполнения разными аллелями $N - N_a$ хромосом, входящих в популяцию.

Всего существует $\bar{C}_{N_a}^N = C_{N_a+N-1}^N = \frac{(N_a+N-1)!}{(N)!(N_a-1)!}$ вариантов заполнения одного и

того же локуса в популяции. Тогда вероятность того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе равна:

$$\begin{aligned}
p_1 &= \frac{\text{Число благоприятных событий}}{\text{Число всех событий}} = \frac{(N-1)!}{\frac{(N-N_a)!(N_a-1)!}{(N_a+N-1)!}} = \\
&= \frac{(N-1)!N!(N_a-1)!}{(N-N_a)!(N_a-1)!(N_a+N-1)!} = \frac{(N-1)!N!}{(N-N_a)!(N_a+N-1)!} = \\
&= \frac{(N_a+N-1-N_a)!N!}{(N-N_a)!(N_a+N-1)!} = \frac{A_N^{N_a}}{A_{N_a+N-1}^{N_a}} = \frac{N \cdot (N-1) \cdot \dots \cdot (N-N_a+1)}{(N_a+N-1) \cdot (N_a+N-2) \cdot \dots \cdot N} = \\
&= \frac{(N-1) \cdot \dots \cdot (N-N_a+1)}{(N_a+N-1) \cdot (N_a+N-2) \cdot \dots \cdot (N+1)}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

где $A_N^{N_a}$, $A_{N_a+N-1}^{N_a}$ – число размещений.

Соответственно вероятность того, что все N_c локусов будут содержать полный набор аллелей каждый, равна:

$$p_{N_a} = (p_1)^{N_c} = \left(\frac{A_N^{N_a}}{A_{N_a+N-1}^{N_a}} \right)^{N_c} \tag{4.8}$$

Вероятность того, что какой-либо из локусов не будет содержать полный набор аллелей, равна:

$$1 - p_{N_a} = 1 - \left(\frac{A_N^{N_a}}{A_{N_a+N-1}^{N_a}} \right)^{N_c} \tag{4.9}$$

4.2.3 Кроссинговер

Эволюция начинается из популяции случайно сгенерированных особей и представляет собой итеративный процесс, на каждом шаге которого формируется новая популяция из следующих составляющих:

- особи с наилучшими значениями фитнес-функции, входящие в состав текущей популяции;
- особи, полученные в результате кроссинговера особей, выбранных в качестве родителей из состава текущей популяции;
- особи, полученные в результате мутаций особей, выбранных в качестве родителей из состава текущей популяции.

Действия кроссинговера и мутации могут выполняться в соответствии с различными алгоритмами.

Автором исследована возможность применения различных типов кроссинговера для решения задачи построения ГО. На Рисунке 4.9 приведена классификация алгоритмов кроссинговера [154] [155] [156].

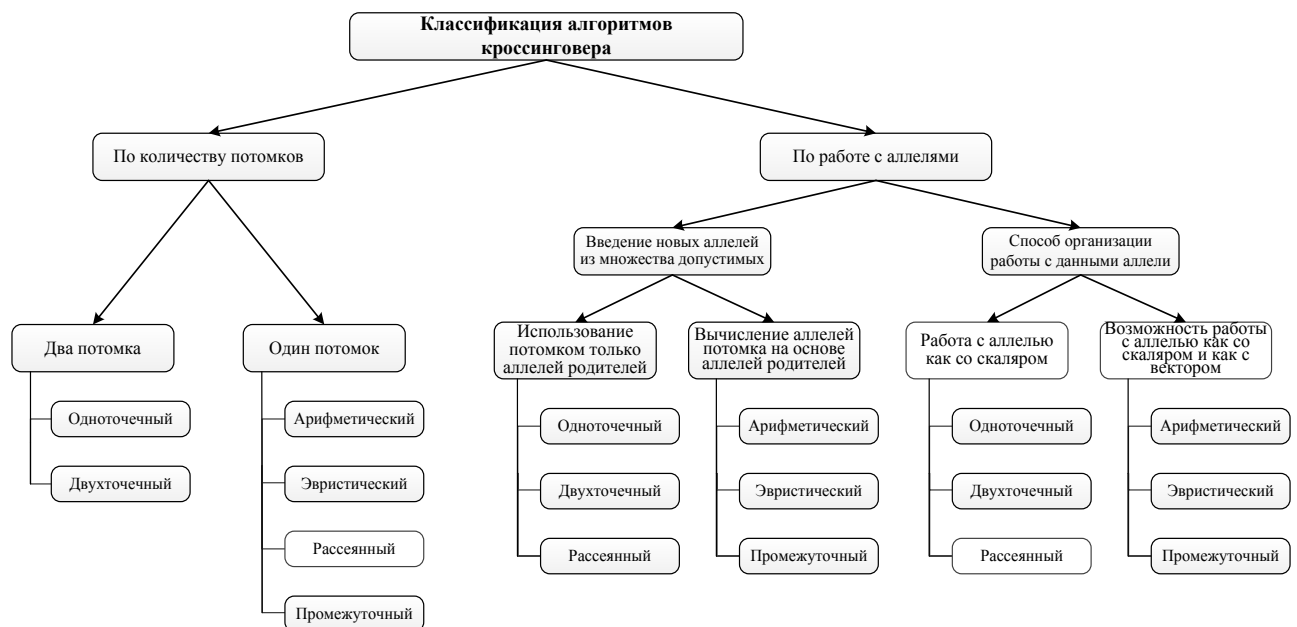


Рисунок 4.6 – Классификация алгоритмов кроссинговера

При одноточечном и двухточечном кроссинговерах появляется два потомка. При одноточечном кроссинговере случайным образом определяется локус, левее которого, включая указанный локус, хромосома одного потомка является копией хромосомы одного родителя, а правее – другого. У второго потомка наоборот:

левее выбранного локуса, включая его самого, хромосома является копией хромосомы второго родителя, а правее – первого (Рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Одноточечный кроссинговер

При двухточечном кроссинговере случайным образом определяются значения двух локусов. У первого потомка между выбранными локусами, включая их самих, хромосома является копией хромосомы первого родителя, а вне – второго. У второго потомка наоборот: между выбранными локусами, включая их самих, хромосома является копией хромосомы второго родителя, а правее – первого (Рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Двухточечный кроссинговер

При арифметическом кроссинговере аллель гена потомка определяется как среднее арифметическое аллелей генов родителей, имеющих тот же локус, с учетом ограничений на область допустимых значений.

При эвристическом кроссинговере хромосома потомка является концом вектора, полученного путем умножения исходного вектора на константу, большую единицы. Началом исходного вектора является хромосома родителя с худшим значением фитнес функции, концом – хромосома родителя с лучшим значением фитнес функции. Начала исходного и результирующего векторов

совпадают. При изменении длины вектора учитываются ограничения на область допустимых значений.

При промежуточном кроссинговере аллель гена потомка определяется как среднее взвешенное значение аллелей генов родителей, имеющих тот же локус, с учетом ограничений на область допустимых значений. Сумма весов аллелей родителя равна единице, веса определяются пользователем алгоритма.

При рассеянном (равномерном) кроссинговере аллель гена потомка равна аллели гена одного из родителей, имеющего тот же локус. Выбор родителя осуществляется случайным образом (Рисунок 4.9).

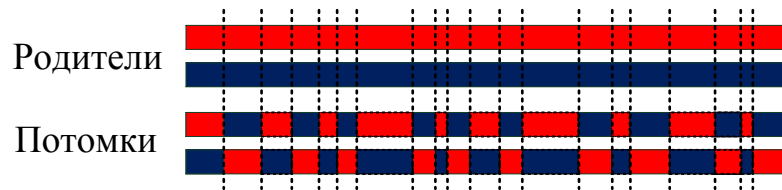


Рисунок 4.9 – Равномерный кроссинговер

Компоненты кортежа $\mathbf{k} = (p, t_b)$, описывающего кандидата, имеют разную природу: время $\mathbf{k} : t_b$ и место $\mathbf{k} : p$. При таких способах кроссинговера, как арифметический, эвристический и промежуточный, это необходимо учесть. Есть два варианта реализации этих типов кроссинговера.

При первом способе кроссинговер применяется непосредственно к номерам кандидата в множестве кандидатов, упорядоченном в лексикографическом порядке. Значение аллели изменяется в пределах от 1_k до N_k .

Для арифметического и промежуточного кроссинговеров выражения, в соответствии с которыми выполняется вычисление, имеют вид:

$$c = \alpha * parent1 + (1 - \alpha)parent2 \quad (4.10)$$

где $parent1, parent2$ – значения аллелей родителей, причем

$$score(parent1) \leq score(parent2);$$

$score$ – значение фитнес функции;

c – результат вычисления значения аллели потомка без учета ограничения на диапазон изменения;

α - весовой коэффициент:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha \leq 1 & \text{при арифметическом} \\ \alpha \leq h < 1 & \text{при промежуточном} \end{cases}$$

h – максимальное значение весового коэффициента, заданное пользователем.

Для эвристического кроссинговера выражения, в соответствии с которыми выполняется вычисление, имеют вид:

$$\begin{aligned} c &= parent2 + \alpha(parent1 - parent2) \\ \alpha &> 1 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Ограничение на диапазон изменения значения аллели потомка $child$ реализуется следующим образом:

$$child = \begin{cases} c, & \text{если } 1 \leq c \leq N_k \\ 1, & \text{если } 1 > c \\ N_k, & \text{если } c > N_k \end{cases} \quad (4.12)$$

При втором (векторном) способе действия применяются отдельно к каждому компоненту кортежа, а затем по полученным значениям определяется номер кандидата в упорядоченном множестве кандидатов, который определяет значение аллели:

$$time = \begin{cases} ct, & \text{если } time_{\min} \leq ct \leq time_{\max} \\ time_{\min}, & \text{если } time_{\min} > ct \\ time_{\max}, & \text{если } ct > time_{\max} \end{cases} \quad (4.13)$$

$$place = \begin{cases} cp, & \text{если } place_{\min} \leq cp \leq place_{\max} \\ place_{\min}, & \text{если } place_{\min} > cp \\ place_{\max}, & \text{если } cp > place_{\max} \end{cases}$$

К компоненте время **k**: t_b применяется непосредственно используемый тип кроссинговера (арифметический, эвристический и промежуточный).

К компоненте место **k**: p применяется рассеянный (равномерный) тип кроссинговера.

При первом скалярном способе кроссинговер применяется к номерам кандидатов, как изображено на Рисунке 4.10 и Рисунке 4.11.

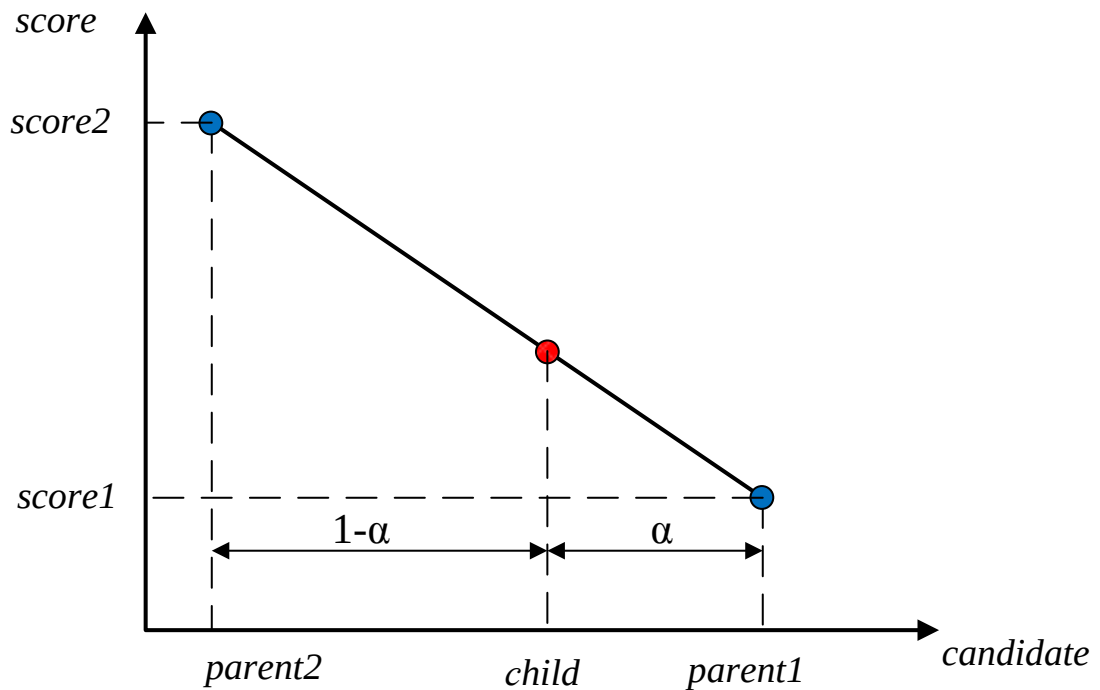


Рисунок 4.10 – Арифметический и промежуточный кроссинговеры в скалярном виде

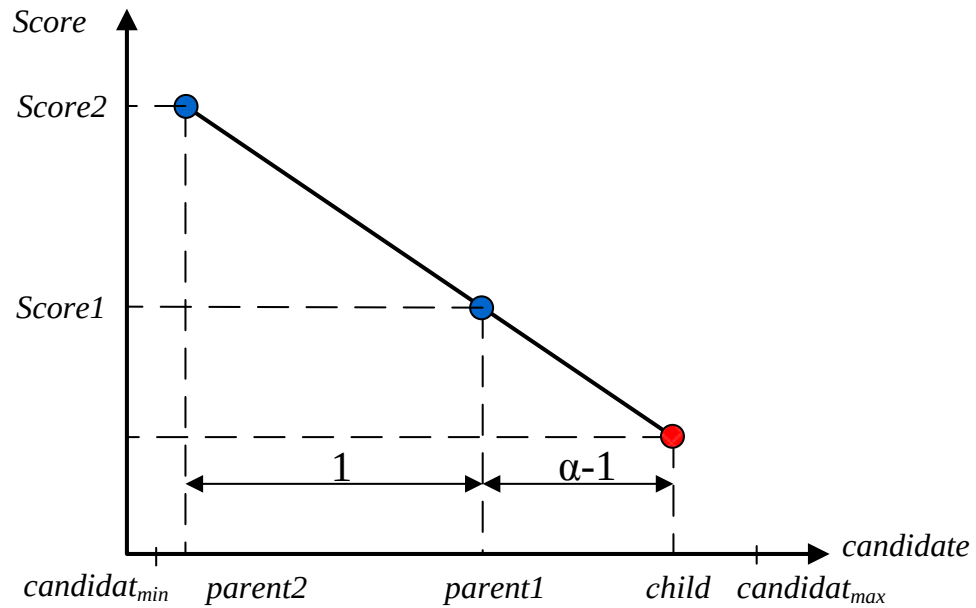


Рисунок 4.11 – Эвристический кроссинговер в скалярном виде

При втором векторном способе действия применяются к каждому компоненту отдельно, и по полученным результатам определяют номер кандидата, который определяет значение аллели, как изображено на Рисунке 4.12 и Рисунке 4.13.

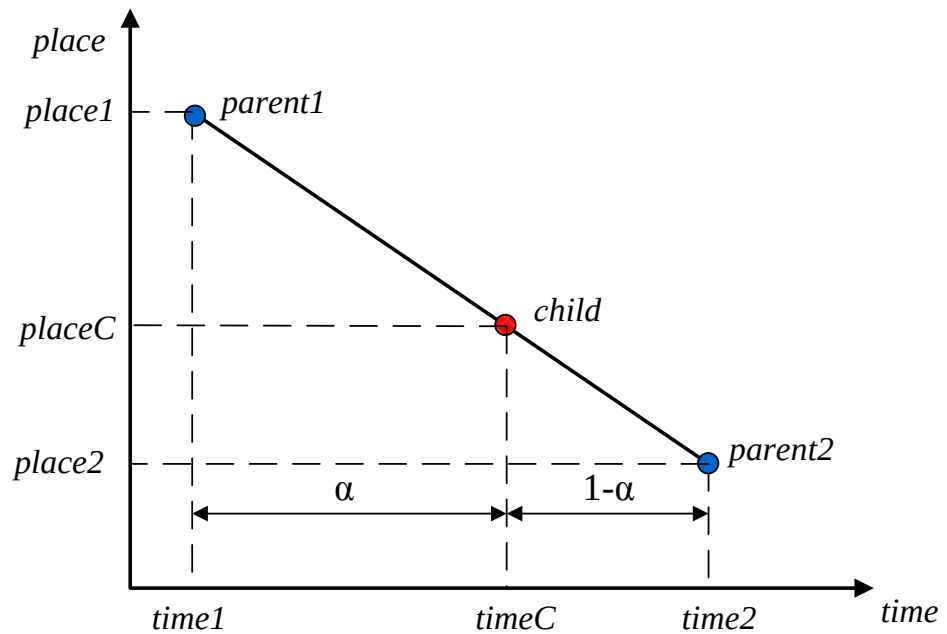


Рисунок 4.12 – Арифметический и промежуточный кроссинговеры в векторном виде

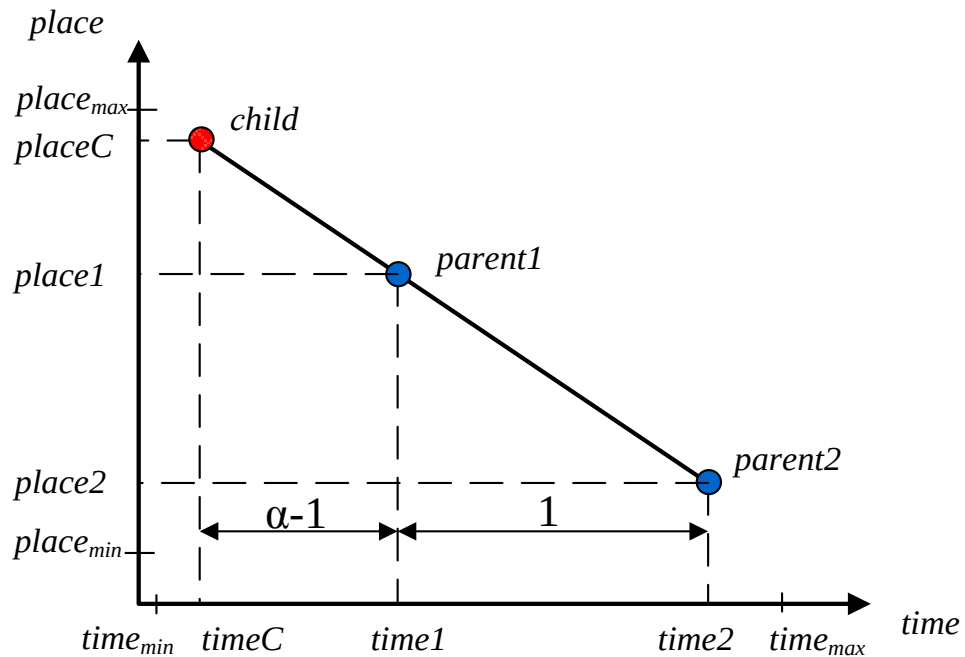


Рисунок 4.13 – Эвристический кроссинговер в векторном виде

4.2.4 Мутация

Мутации происходят в процессе эволюции в соответствии с определяемой пользователем вероятностью мутации [157]. Эта вероятность должна быть низкой. Если она слишком высока, то поиск превратится в примитивный случайный поиск.

Целью мутации в ГА является сохранение и представление разнообразия. Наличие мутаций позволяет избежать завершения процесса эволюции после нахождения локальных минимумов или ситуации, при которой хромосомы становятся слишком похожи друг на друга, тем самым замедляя или даже останавливая эволюцию. В связи с ограниченным размером популяции, меньшим верхней границы, определенной в п. 4.2.2, вероятность того, что на какой-либо из итераций будет получен такой набор хромосом, из которого путем рекомбинаций не может быть получена любая возможная хромосома, отлична от нуля. Это также обуславливает необходимость мутаций [158] [105].

Найдем необходимую для восстановления утерянного разнообразия вероятность мутации одной хромосомы P_{mc} . Мутация хромосомы происходит, если подвергся мутации один из генов, т.е.:

$$p_{mc} = N_c p_{m1} \quad (4.14)$$

где P_{m1} – вероятность мутации одного гена.

В этом случае вероятность мутации определенного гена хромосомы равна $P_{m1} = \frac{P_{mc}}{N_c}$. Вероятность того, что данный ген хромосомы не мутирует, равна $1 - P_{m1} = 1 - \frac{P_{mc}}{N_c}$. Вероятность того, что данный ген не мутирует ни в одной из хромосом, равна $(1 - P_{m1})^N = \left(1 - \frac{P_{mc}}{N_c}\right)^N$. Соответственно, вероятность того, что данный локус мутирует хотя бы в одной из хромосом, равна $1 - (1 - P_{m1})^N = 1 - \left(1 - \frac{P_{mc}}{N_c}\right)^N$. Для надежности необходимо, чтобы вероятность мутации данного локуса хотя бы в одной из хромосом на порядок превышала вероятность отсутствия в данном локусе во всех хромосомах какого-либо из значений. Тем более, что сам факт мутации еще не означает, что произошла мутация, повышающая полноту использования набора аллелей. Таким образом, необходимо:

$$1 - (1 - p_{m1})^N > 10(1 - p_{N_a}) \quad (4.15)$$

$$\frac{1 - (1 - p_{m1})^N}{10} > (1 - p_{N_a})$$

$$\frac{1 - (1 - p_{m1})^N}{10} - 1 > (-p_{N_a})$$

$$-\frac{1 - (1 - p_{m1})^N}{10} + 1 < (p_{N_a})$$

$$p_{N_a} > 1 - \frac{1 - \left(1 - \frac{p_{mc}}{N_c}\right)^N}{10}$$

Если популяция большая, то мутации теряют смысл

$$1 - \left(1 - \frac{p_{mc}}{N_c}\right)^N > 10 \left(1 - \left(\frac{A_N^{N_a}}{A_{N_a+N-1}^{N_a}}\right)^{N_c}\right) \quad (4.16)$$

Отсюда

$$p_{mc} > N_c \left(1 - \left(1 - 10 \left(1 - \left(\frac{A_N^{N_a}}{A_{N_a+N-1}^{N_a}}\right)^{N_c}\right)\right)^{1/N}\right), \quad p_{mc} > N_c \left(1 - (1 - 10(1 - p_{N_a}))^{1/N}\right) \quad (4.17)$$

В зависимости от типа генов выделяют следующие типы мутации:

– в случае, если гены, образующие хромосомы, представляют собой последовательность двоичных разрядов, возможна «битовая мутация» – инвертирование группы случайно выбранных бит в гене (в предельных случаях единственного или всех);

– для любых видов генов:

- замена значений генов на их максимально или минимально допустимое значение, выбор осуществляется случайным образом;
- замена значения выбранного гена на значение случайной величины, распределенной по заданному (равномерному, усеченному нормальному или др.) закону распределения в диапазоне допустимых для заданного гена значений;
- перестановка двух случайно выбранных групп генов местами.

4.2.5 Условия окончания работы генетического алгоритма

В блоке 8 укрупненной схемы ГА, решающего задачу построения прототипа ГО, (Рисунок 4.5) проверяется условие окончания работы алгоритма. Это условие включает в себя проверку истинности логических утверждений, связанных функцией логического сложения, которые можно разделить на следующие группы:

- ограничение на продолжительность работы алгоритма, превышено
- ограничение по
 - времени работы или
 - максимальному числу поколений;
- на значение и скорость изменения фитнес-функции;
 - значения фитнес-функции достигло предельное (минимальное или максимальное) значение;
 - значение фитнес-функции изменяется медленнее допустимого (относительное изменение, средне-квадратическое изменение или какой-то более сложный критерий оценки скорости изменения фитнес-функции меньше допустимого порога);
- их комбинация – значение фитнес-функции не изменяется на протяжении промежутка времени, превышающего допустимый.

4.3 Результаты построения прототипа ГО

В ходе диссертационного исследования с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB разработано программное обеспечение системы поддержки принятия решения (СППР), реализующей ГА применительно к решению задачи построения ГО [159]

[160]. На Рисунке 4.14 представлен интерфейс разработанной СППР. СППР адаптируется к особенностям задачи путем:

- расширения множества фитнес-функций, которые могут быть вычислены на основе знаний о параметрах множества аллелей;
- считывания информации о множестве аллелей и структуре хромосомы из внешнего файла;
- выбора типа кроссинговера и числовых параметров ГА.

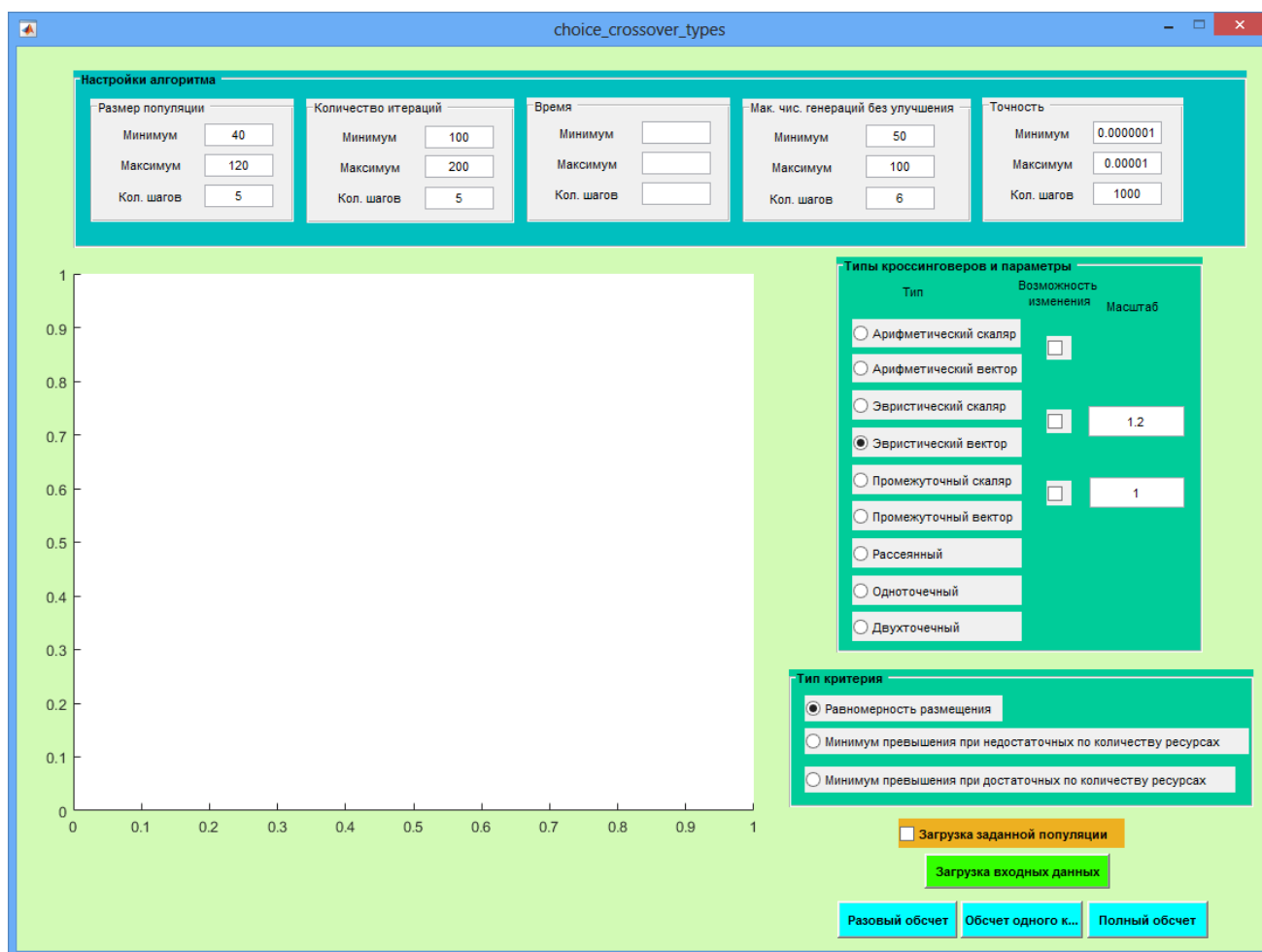


Рисунок 4.14 – Интерфейс СППР

Результаты выполненного для одной из линий Московского метрополитена по формуле (4.7) расчета вероятности того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе представлены на Рисунке 4.15 и в Таблице 4.3. В рассматриваемом случае $N_a = 38$, $N_c = 13$.

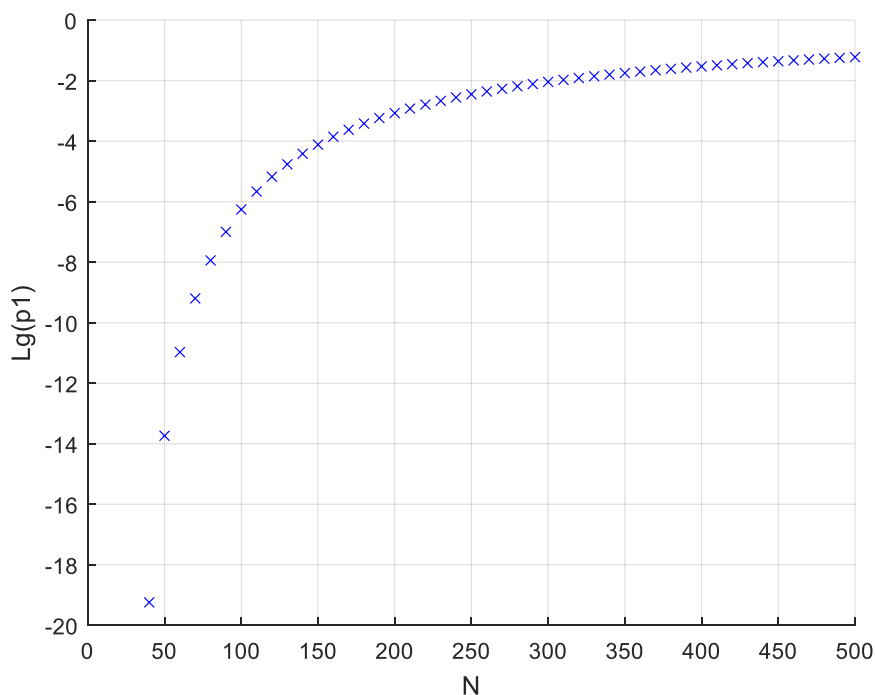


Рисунок 4.15 – Вероятность того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе

Результаты выполненного для одной из линий Московского метрополитена по формуле (4.8) расчета вероятности того, что все N_c локусов будут содержать полный набор аллелей каждый представлены на Рисунке 4.16 и в Таблице 4.3.

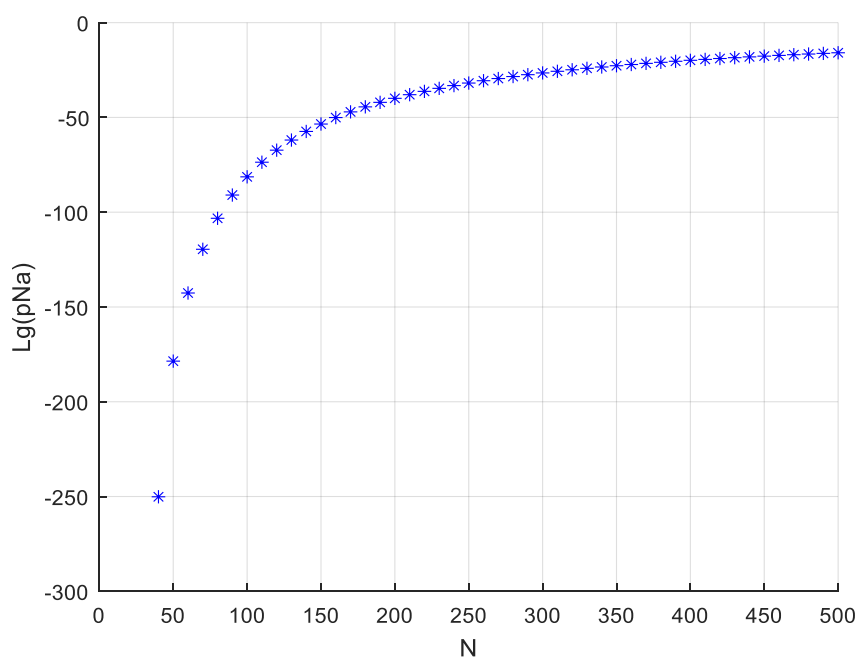


Рисунок 4.16 – Вероятность того, что все локусы будут содержать полный набор аллелей каждый

Результаты выполненного для одной из линий Московского метрополитена по формуле (4.8) расчета вероятности того, что какой-либо из локусов не будет содержать полный набор аллелей представлены на Рисунке 4.17.

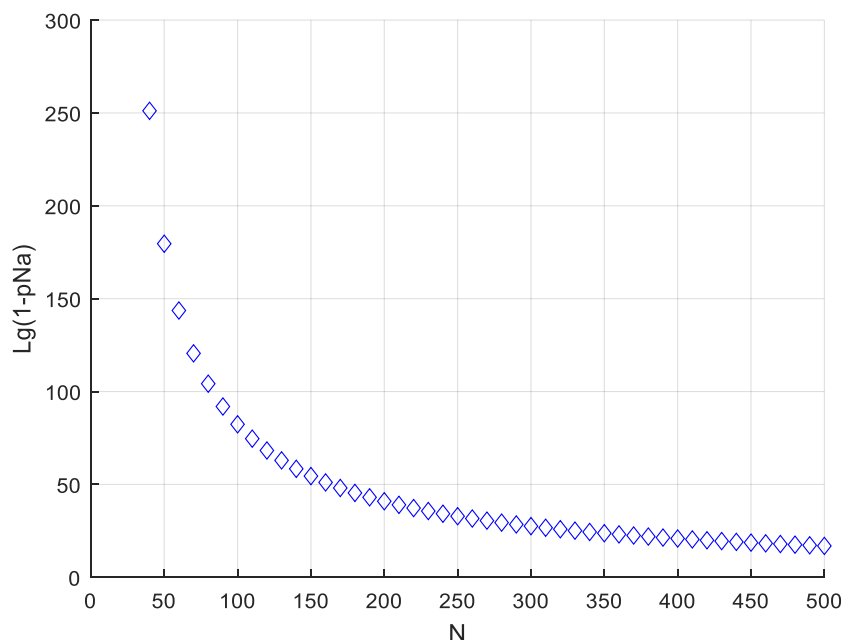


Рисунок 4.17 – Вероятность того, что какой-либо из локусов не будет содержать полный набор аллелей равна

Таблица 4.3 – Результаты расчетов вероятностей того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе p_1 и все локусы будут содержать полный набор аллелей каждый p_{N_a}

N	p_1	p_{N_a}
40	5,73E-20	7,21E-251
50	1,83E-14	2,63E-179
60	1,07E-11	2,33E-143
70	6,35E-10	2,74E-120
80	1,15E-08	6,01E-104
90	1,01E-07	1,13E-91
100	5,52E-07	4,43E-82
110	2,17E-06	2,34E-74
120	6,69E-06	5,36E-68

На Рисунках 4.18-4.23 представлены результаты построения ГО для одной из линий Московского метрополитена с использованием разработанной СППР.

На Рисунке 4.18 представлены результаты построения ГО для случая, когда необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС (4.4) выполняется и фитнес-функция в виде (4.2) отражает равномерность размещения ГО. Рисунок позволяет сравнить ГО, соответствующий используемому на Московском метрополитене ПГД, и предложенный прототип. Данные о реальных осмотрах приведены в виде синих прямоугольников, а о предложенных – в виде зеленых прямоугольников. Анализ приведенных данных показал следующее.

- Осмотры в рамках используемого на метрополитене ПГД проводятся чаще, чем это требуют условия безопасности. На рассматриваемом графике их 20 (каждый заход в депо в течение дня с последующим выходом в тот же день сопровождается осмотром, если не оговорено обратное), а в соответствии с требованиями безопасности их должно быть 13. Это связано с тем, что на линии имеются достаточные ресурсы для проведения осмотров и в дневной час-«непик» количество составов на линии на треть меньше максимального.

- В используемом на метрополитене ПГД многие маршруты находятся в движении не с момента подачи напряжения на контактный рельс и не до момента окончания движения по линии. Только треть маршрутов начинает движение раньше 6 утра или заканчивает позже часа ночи.

В связи с этим имеет смысл рассматривать случаи наличия ограниченных ресурсов, то есть невыполнения необходимого условия построения ГО (4.4). Соответствующий ГО, при построении которого множество кандидатов, которые можно использовать для проведения осмотров, было сокращено вдвое, приведен на Рисунке 4.19. Построение ПГД в этом случае возможно при учете необходимости уменьшения времени в движении между двумя осмотрами путем ввода дополнительного отстоя, раннего ухода на ночную расстановку или более позднего выхода из нее, что нашло отражение на ГО. Для поиска решения использовался критерий (4.6), а «мнимый» осмотр попал на цепочку 10-14 маршрутов. На этой цепочке должно размещаться при наличии необходимых

ресурсов три осмотра, а не два.

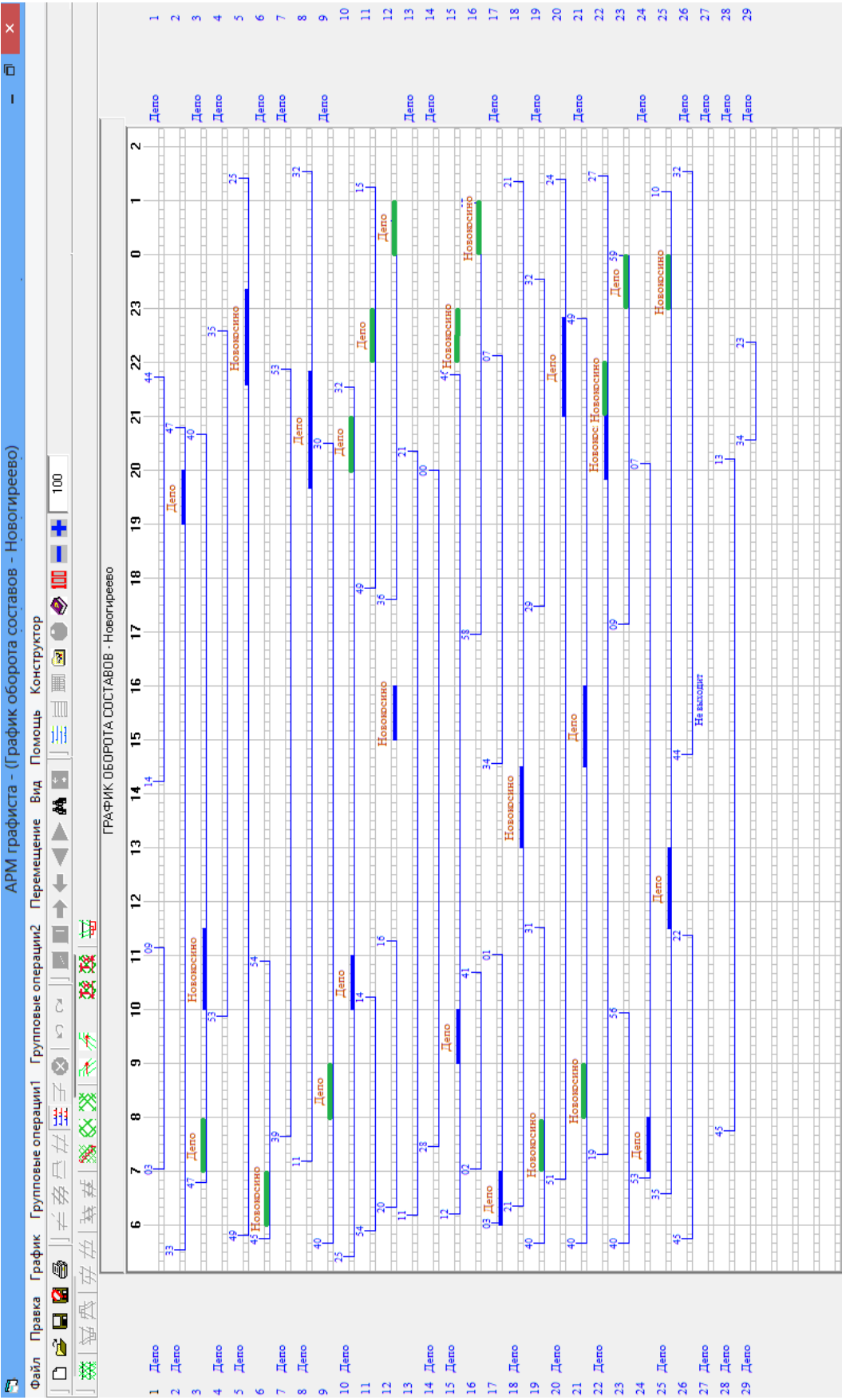


Рисунок 4.18 – Результаты построения ГО для случая, когда необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС выполняется

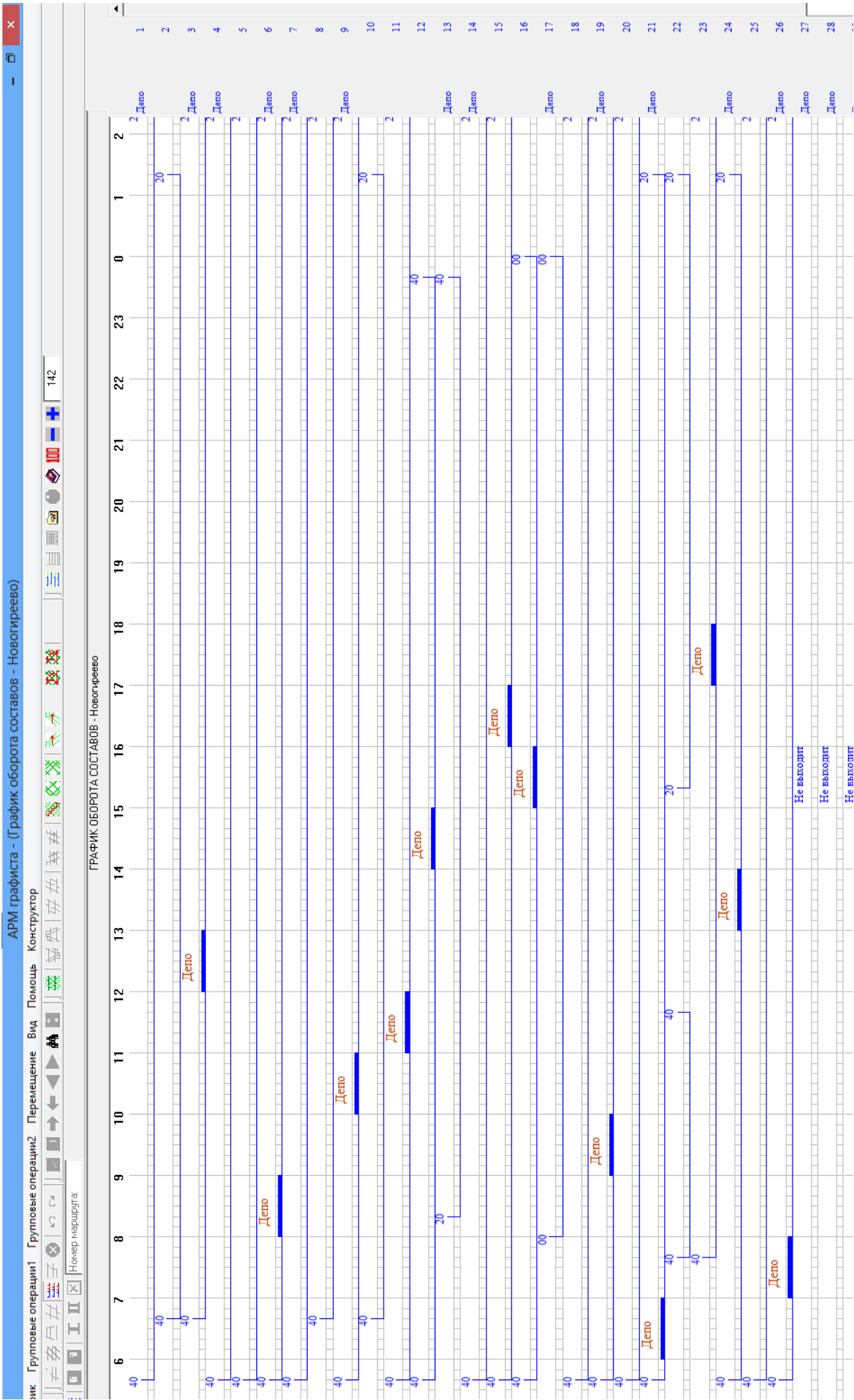


Рисунок 4.19 – Результаты построения ГО для случая, когда необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС не выполняется

Данные, приведенные на графиках, позволяют проанализировать функционирование различных алгоритмов кроссинговера. При одной и той же начальной популяции разные алгоритмы кроссинговера приводят к правильному решению (признаком остановки работы алгоритма является то, что значение фитнес-функции изменяется медленнее допустимого) за разное количество итераций, различающееся почти на треть. При этом не всегда увеличение числа итераций приводит к уменьшению значения фитнес-функции, значения которой могут различаться более, чем в два раза (Рисунок 4.20) [153].

Рисунок 4.21 показывает, как меняется минимальное найденное значение фитнес-функции в ходе эволюции. График отражает зависимость десятичного логарифма наилучшего в популяции значения фитнес-функции от номера итерации. Такой способ представления выбран в связи с тем, что на первых итерациях может сложиться ситуация, при которой популяция включает в себя только такие варианты построения ГО, которые не отвечают ограничениям по периодичности проведения ТО, что приводит к резкому возрастанию значений фитнес-функции, которая в этой ситуации приравнивается к значению штрафной функции [154]. Одновременно график показывает, как меняется в популяции количество хромосом, попадающих в область допустимых значений. Таким образом, при помощи ГА можно быстро найти некоторое множество допустимых решений, мощностью больше единицы, что важно при совместном построении ПГД и ГО [53].

Рисунки 4.22-4.23 иллюстрируют зависимость параметров решения задачи от размера популяции. Из графиков видно, что увеличение размера популяции приводит к тому, что при всех алгоритмах кроссинговера завершение работы ГА происходит после меньшего количества итераций. При этом различие между минимальными найденными значениями фитнес-функции при использовании различных алгоритмов кроссинговера сокращается [155].

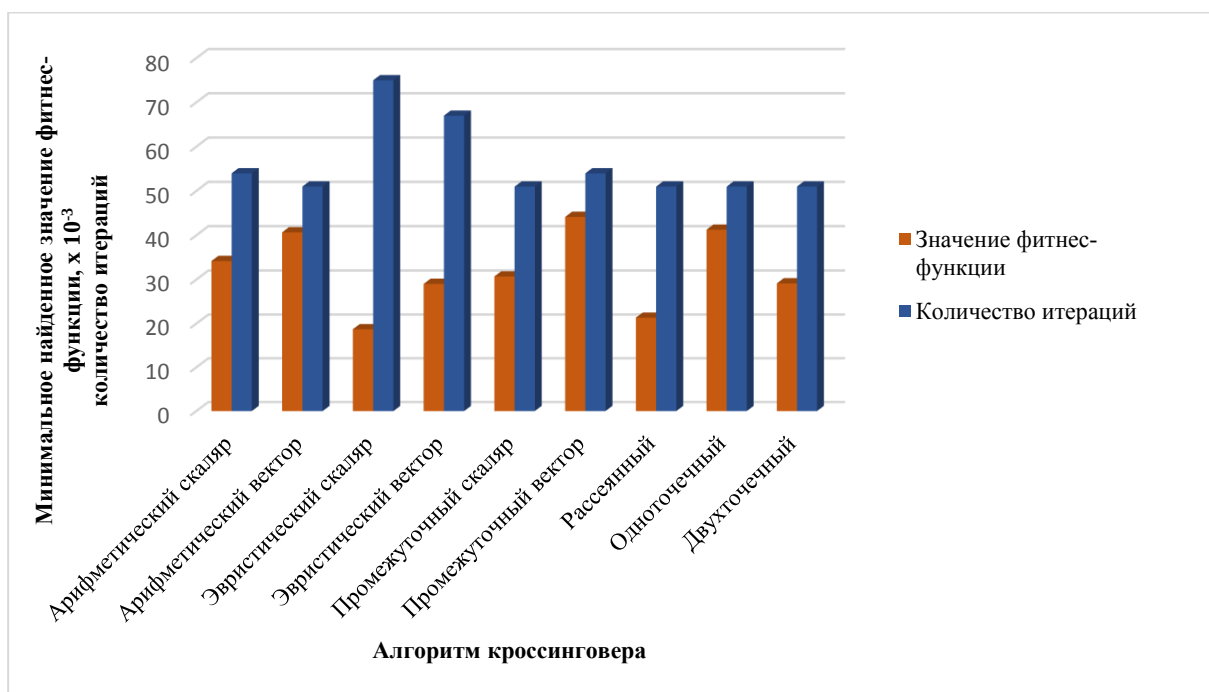


Рисунок 4.20 – Зависимость минимального найденного значения фитнес-функции и выполненного количества итераций от алгоритма кроссинговера

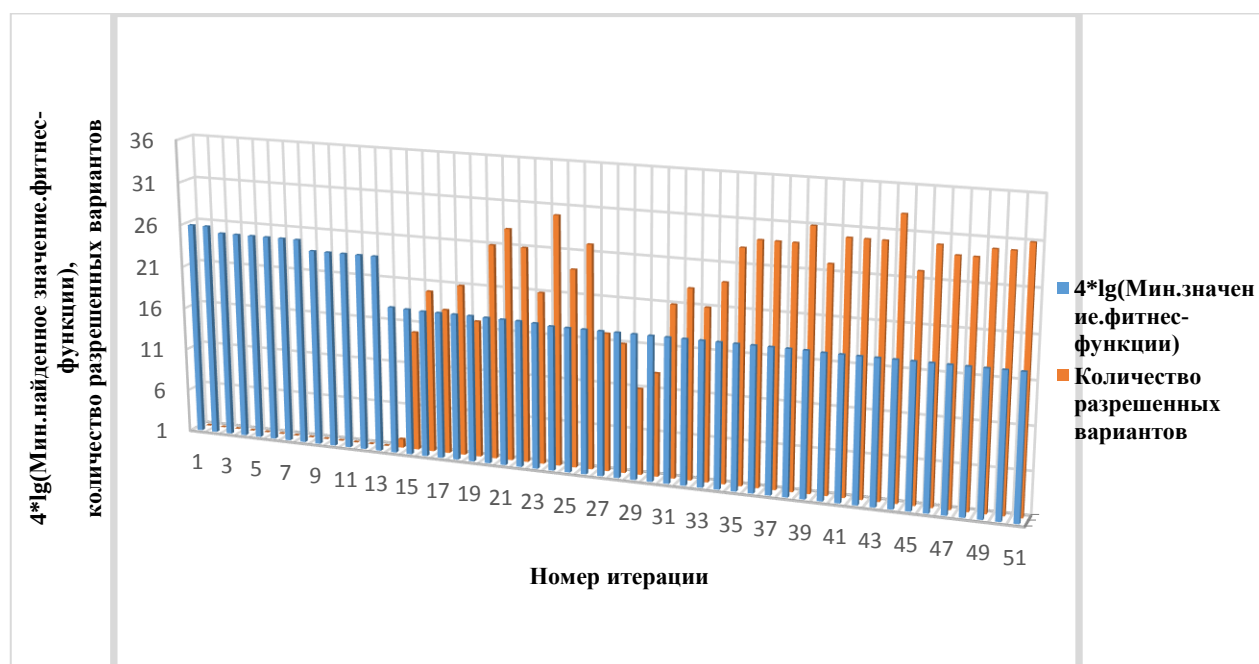


Рисунок 4.21 – Зависимость десятичного логарифма минимального найденного значения фитнес-функции и количества разрешенных вариантов в популяции от номера итерации

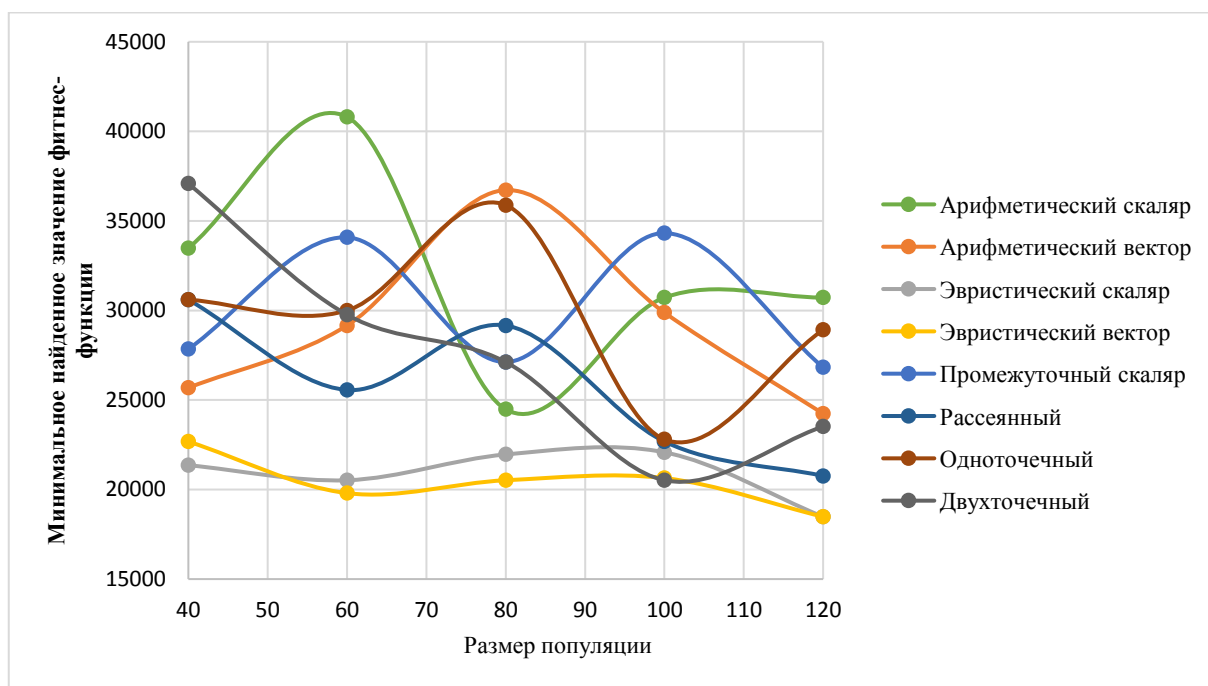


Рисунок 4.22 – Зависимость минимального найденного значения фитнес-функции от размера популяции и алгоритма кроссинговера

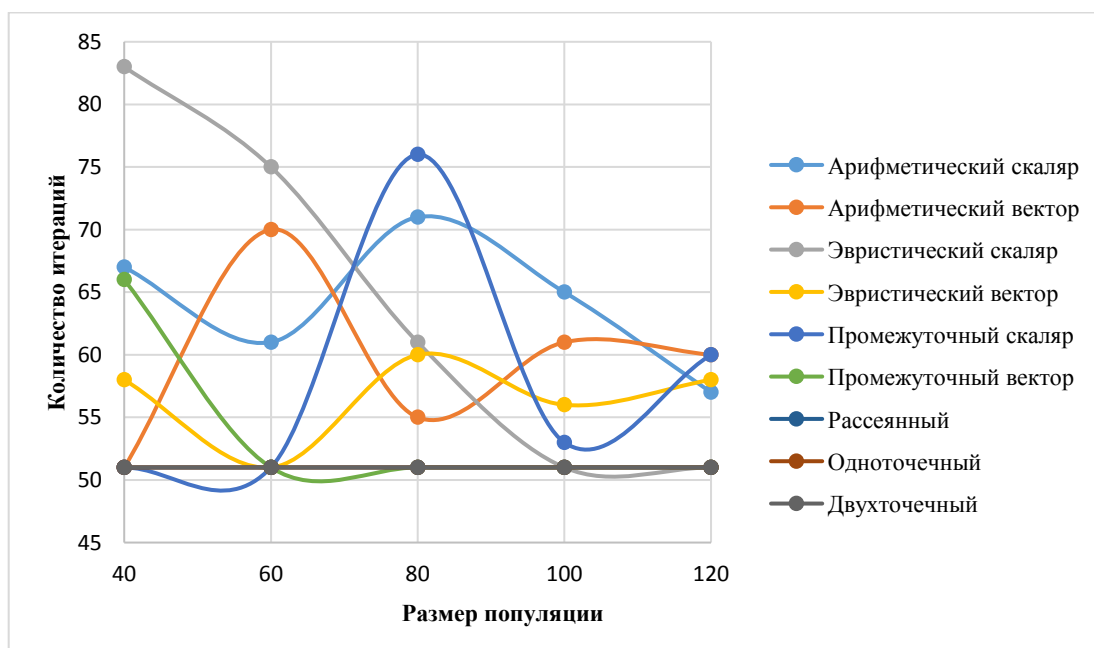


Рисунок 4.23 – Зависимость выполненного количества итераций от размера популяции и алгоритма кроссинговера

Примером адаптации СППР к решению различных задач планирования движения поездов может служить возможность использования ее для

оптимизации ПГД в смысле выбранных критериев. ПГД и ГО ЭПС, находятся в тесной взаимосвязи, в первую очередь, с точки зрения выбора места и времени проведения ТО, а также способа организации ночной расстановки составов.

В [96] рассмотрено решение задачи организации ночной расстановки составов по критерию минимизации времени окончания движения электропоездов. Кроме этого сравнение вариантов ПГД может проводиться по таким показателям, как:

- количество разменов маршрутов через депо;
- количество регулировочных отстоев на станционных путях линии;
- суммарная длительность регулировочных отстоев;
- средняя длительность регулировочных отстоев;
- максимальная длительность регулировочных отстоев.

Организация ночной расстановки составов предполагает установление однозначного соответствия маршрутов указателям ночной расстановки составов на линии. В работе [151], авторы представили решение задачи построения совокупности всех возможных вариантов организации ночной расстановки ЭПС на станции метрополитена, основываясь на теории графов [161]. Дальнейшее развитие математического обеспечения решения этой задачи может быть связано с применением ГА для установления соответствия маршрутов точкам ночной расстановки. Так как количество маршрутов и указателей одинаковое, то любое из двух множеств может рассматриваться как множество аллелей и эффективными могут оказаться алгоритмы мутации, так как процесс кроссинговера фактически сводится к процессу мутации.

Основные выводы и результаты по главе

1. Формализованы способы описания фитнес-функции, хромосомы, кроссинговера, учитывающие особенности аллелей, используемых при организации работы генетического алгоритма для решения задачи построения графика оборота электроподвижного состава при выполнении и невыполнении необходимого условия построения ГО.

2. Сформулирован способ определения размера первичной популяции и необходимости мутаций на основе заданной вероятности того, что случайный набор хромосом будет содержать все возможные значения аллелей в выбранном локусе.

3. Показана сходимость результатов, полученных в ходе работы созданной СППР с разными фитнес-функциями, с данными, полученными в результате работы опытных инженеров–графистов Московского метрополитена без использования данной системы, известные результаты получены как частный случай результатов данной работы.

4. Исследована возможность применения генетических алгоритмов для задач планирования перевозочного процесса на примере решения задач планирования технического обслуживания электроподвижного состава метрополитена при использовании различных множеств ресурсов, в том числе и в условиях наличия недостаточных ресурсов, позволяет эффективно и оперативно учитывать изменение условий при автоматизации технического обслуживания электроподвижного состава метрополитена в условиях развивающихся метрополитенов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача совершенствования методики автоматизированного планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов при учёте возможности расширения множеств объектов линии, имеющая существенное значение для развития систем автоматизации планирования движения поездов.

1. Выполненная классификация работ, посвященных проблемам разработки бизнес-логики автоматизированного построения ПГД и ГО и управления транспортными системами, по предмету исследования и математическим методам, применяемым к решению поставленных задач, позволила выбрать перспективные направления и методы решения оптимизационных задач планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов, к которым относятся графовые модели и генетические алгоритмы. Применение этих методов позволяет расширить множество поиска решений оптимизационных задач и повысить скорость их решения.

2. Реализованные синтез процесса сбора и анализа данных ПГД и ГО, его декомпозиция и модели процессов, входящих в процесс сбора и анализа данных ПГД и ГО, позволили определить множества моделей бизнес-логики средств автоматизации планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов и элементов интерфейса этих средств, разделить части программного обеспечения, отвечающего за реализацию моделей бизнес-логики, от части программного обеспечения, отвечающего за решение задач визуализации результатов работы средств автоматизации и организации информационного обмена с пользователями. Это способствует повышению производительности труда при создании соответствующих средств автоматизации и позволяет оперативно учесть в средствах автоматизации изменения, присущие развивающимся метрополитенам.

3. Созданный в ходе решения задачи автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов метод топологической сортировки вершин графа с учетом действующих ограничений позволяет эффективно и оперативно учитывать изменение условий при автоматизации планирования движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов, а также значительно расширить множество вариантов, рассматриваемых при автоматизированном построении ночной расстановки составов на линии метрополитена.

4. Применение ГА к решению задач построения ГО ЭПС показало возможность рассмотрения в качестве аллелей векторных величин и адаптации генетических алгоритмов к решению широкого класса задач планирования перевозочного процесса. Разработанная СППР имеет развитые возможности для выполнения такой адаптации. Показана перспектива использования ГА для оптимизации ПГД в смысле выбранных критериев, в частности, при организации ночной расстановки составов на линии метрополитена.

5. Разработанные методы позволяют решать задачи планирования движения поездов в условия наличия ограниченных ресурсов для реализации требований, предъявляемых к ПГД и ГО, что имеет особую актуальность в условиях развивающихся метрополитенов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thida, M. Yangon circular railway development project / M. Thida, Z. Zhui, Z. Xiaojing, M. H. Yudhistira, J. Volinski, University of Tokyo, Real Estate and Urban Development Policy, 2012. – 30 с.
2. Hammond, C. JICA proposes underground railway [Электронный ресурс]/ C. Hammond // Myanmar Times. – 2015. – Режим доступа: <https://www.mmtimes.com/business/15910-jica-proposes-underground-railway.html>.
3. Turner, C. A Review of Key Planning and Scheduling in the Rail Industry in Europe and UK / C. Turner, A. Tiwari, A. Starr, K. Blacktop // Rail and Rapid Transit: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. – 2016. – Vol. 230. – № 3. – С. 984–998.
4. Abed, S. K. European rail traffic management system / S. K. Abed // International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ). – 2010. – С. 173–180.
5. Baba, Y. Radio-based train control system / Y. Baba, A. Hiratsuka, E. Sasaki, O. Yamamoto, M. Miyamoto // Hitachi Review. – 2012. – № 61. – С. 341–346.
6. Lu, J. HCSP formal modelling and verification method and its application in the hybrid characteristics of a high speed train control system / J. Lu, K. Li, T. Tang, L. Chen // WIT Transactions on the Built Environment, Southampton: WIT Press - Computers in Railways. – 2012. – Vol. XIII. – С. 15–25.
7. Guo, B. Y. Research on the simulation of an Automatic Train over speed Protection driver-machine interface based on Model Driven Architecture / B. Y. Guo, W. Du, Y. J. Mao // Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems : Computers in Railways, WIT Press. – 2010. – Vol. XII. – С. 13–120.
8. Kuckelberg, A. Real-time asynchronous conflict solving algorithms for

- computer aided train dispatching assistance systems / A. Kuckelberg, E. Wendler // Computers in Railways XI : WIT Transactions on the Built Environment, WIT Press. – 2008. – С. 555–563.
9. Wegele, S. Comparing the effectiveness of two real-time train rescheduling systems in the case of perturbed traffic conditions / S. Wegele, F. Corman, A. D'Ariano // Timetable Planning and Information Quality: WIT Press. – 2010. – С. 189–199.
 10. Forsgren, M. Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making / M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg // Computers in Railways XIII : Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems : WIT Press. – 2012. – С. 439–450.
 11. Ho, T. K. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimisation / T. K. Ho, C. W. Tsang, K. H. Ip, K. S. Kwan // Expert System Applications. – 2012. – Vol. 39. – С. 861–868.
 12. Noah, J. G. Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes / J. G. Noah // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2014. – № 2424. – С. 58–65.
 13. Jabri, S. European railway traffic management system validation UML/Petri nets modelling strategy / S. Jabri, E. M. EL Koursi, T. Bourdeaud'huy, E. Lemaire // European transport Research Review. – 2010. – Vol. 2. – С. 113–128.
 14. Чжо, М. А. Методика автоматизации построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / М. А. Чжо, А. С. Петров, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Материалы международной научно-практической конференции «Транспорт и образование: актуальные вопросы и тенденции.» – ЧУПС УрГУПС. – 2015. – С. 74–80.
 15. Nash, A. RailML-a standard data interface for railroad applications / A. Nash, D. Huerlimann, J. Schuette, V. P. Krauss // Computers in Railways IX, WIT Transactions on the Built Environment: WIT Press. – 2004. – С. 233–240.

16. Чжо, М. А. Автоматизация исполнения императивов построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / М. А. Чжо, А. С. Петров // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2015 «Наука МИИТа – транспорту». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2015. – С. III. 78–79.
17. Брукшир, Д. Г. О компьютерных науках / Д. Г. Брукшир, В. Н. Штонда // Вильямс, 2001. – 688 с.
18. Бекман, И. Н. Компьютерные науки / И. Н. Бекман // Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 2009. – 24 с.
19. Терелянский, П. В. Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования: монография / П. В. Терелянский // Волгоград, 2009. – 126 с.
20. Чжо, М. А. Автоматизация планирования движения поездов метрополитена как средство снижения рисков нарушений безопасности движения / М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2015. – С. III. 14–15.
21. Фаулер, М. UML основы. Краткое руководство по стандартному языку объектного моделирования / М. Фаулер. СПб : Символ-Плюс, 2012. – 192 с.
22. Чжо, М. А. Применение современных технологий программирования к автоматизации планирования движения поездов метрополитена / М. А. Чжо, К. М. Филипченко, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Автоматика на транспорте. – 2016. – Vol. 2. – № 3. – С. 331–347.
23. Феофилов, А. Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 10–13.
24. Быков, В. П. Теоретические и методологические основы построения систем поддержки принятия решений при управлении движением поездов на участках железных дорог / В. П. Быков // Хабаровск: ДВГУПС. – 1999. –

С. 135.

25. Сидоренко, В. Г. Центр ситуационного управления линией метрополитена / В. Г. Сидоренко, Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев // ТЕМРТ XXI - ТРАНСПОРТЪТ НА XXI ВЕК : сборник доклади единадесета научна конференция с международно участие. – София: ТЕМРТ. – 2001. – С. 61.
26. Сидоренко, В. Г. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко // Мир Транспорта. – 2015. – Vol. 13. – № 4. – С. 154–165.
27. Сидоренко, В. Г. Подсистема автоматизированного построения выхода составов метрополитена из расстановки на ночь / В. Г. Сидоренко, И. А. Власова, Е. Ю. Рындина // Неделя науки-2008. Наука МИИТа транспорту : труды научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2008. – Vol. 7. – С. 38.
28. Сидоренко, В. Г. Синтез планового графика движения зонного типа / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. – 2010. – № 4. – С. 128–134.
29. Сидоренко, В. Г. Автоматизированный синтез стационарных режимов планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. В. Фёдоров // Мир транспорта. – 2004. – № 2. – С. 88–92.
30. Сидоренко, В. Г. Принципы построения автоматизированных средств планирования перевозочного процесса на метрополитене / В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем : материалы XII Международной конференции. – М.: РГГУ. – 2004. – С. 41.
31. Сидоренко, В. Г. Процедуры организации ночной расстановки составов на линии метрополитен / В. Г. Сидоренко, А. С. Пискунов // Вестник МИИТа. – 2008. – № 18. – С. 3–7.
32. Сидоренко, В. Г. Сервисные функции автоматизированной системы планового графика движения пассажирских поездов метрополитена /

- В. Г. Сидоренко // Проблемы регионального и муниципального управления : сборник докладов международной научной конференции. – М.: РГГУ. – 2008. – С. 156–160.
33. Сафронов, А. И. Применение критерия равномерности в больших транспортных системах / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем : труды XVII Международной конференции. – М.: ИПУ РАН. – 2009. – С. 289–292.
 34. Сафронов, А. И. Построение планового графика движения для метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир транспорта. – 2010. – № 3. – С. 98–105.
 35. Сафронов, А. И. Организация интерфейса автоматизированной системы построения планового графика движения поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. В. Ковалёв // Неделя науки-2008. Наука транспорту : труды научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2008. – Vol. VII. – С. 51–52.
 36. Дегтярев, Д. П. Проблемы визуального анализа графика движения поездов на метрополитене и методы их решения / Д. П. Дегтярев, М. Н. Василенко, О. А. Максименко // Неделя науки-2002 : труды научно-практической конференции. – СПб.: ПГУПС. – 2002.
 37. Сеславин, А. И. Градиентный способ централизованного управления городскими транспортными системами / А. И. Сеславин, Л. Н. Воробьева // Наука и техника транспорта. – 2004. – № 4.
 38. Сидоренко, В. Г. Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, Е. Ю. Рындина // ВЕСТНИК МИИТа. – 2008. – № 18. – С. 8–10.
 39. Сафронов, А. И. Оптимизация процедур визуализации графиков движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов // TRANS-MECH-ART-CHEM : труды VII Международной научно-практической

- конференции. – М.: МИИТ. – 2010. – С. 315–317.
40. Пазойский, Ю. О. Автоматизация расчета графика работы поездных бригад в пригородном сообщении / Ю. О. Пазойский, С. А. Бывшев // Сборник научных трудов : Оптимизация эксплуатационной работы железных дорог. М. МИИТ. – 84–90 1981. – № 657.
 41. Пазойский, Ю. О. Оптимизация графика оборота пригородных составов при заданном расписании движения / Ю. О. Пазойский, Н. А. Самарина, // Сборник научных трудов: Вопросы эксплуатации железных дорог / Под ред. Ф.П. Кочнева. - М. МИИТ : Транспорт. – 1970. – № 333. – С. 117–127.
 42. Жербина, А. И. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена / А. И. Жербина, Л. А. Баранов // Вестник ВНИИЖТа. – 1981. – № 2. – С. 17–20.
 43. Жербина, А. И. Составление графиков движения поездов метрополитена на ЭВМ / А. И. Жербина // Тр. МИИТа. – 1977. – № 550. – С. 97–101.
 44. Василенко, М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды международной конференции "Транспорт XXI век". Варшава. 2001.
 45. Mu, S. Scheduling freight trains traveling on complex networks / S. Mu, D. Maged // Transportation Research Part B: Methodological. – 2011. – Vol. 7. – № 45. – С. 1103–1123.
 46. Szpigel, B. Optimal train scheduling on a single line railway / B. Szpigel // Operation Research. – 1973. – С. 344–351.
 47. Sotskov, Y. Shifting bottleneck algorithm for train scheduling in a single-track railway / Y. Sotskov // Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems. – 2012. – Vol. 1. – С. 87–92.
 48. Beugin, J. Galileo for railway operations: Question about the positioning

- performances analogy with the RAMS requirements allocated to safety applications / J. Beugin, A. Filip, J. Marais, M. Berbineau // European Transport Research Review. – 2010. – Vol. 2. – С. 93–102.
49. Christian, S. Railway scheduling problems and their decomposition / S. Christian // Osnabruck, 2007. – 123 с.
 50. Bruker, P. Scheduling Algorithms / P. Bruker // Leipzig: Springer, 2007. – 371 с.
 51. Hu, H. A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving / H. Hu, K. Li, X. Xu // Journal of Modern Transportation. – 2013. – № 21. – С. 9–16.
 52. Brannlund, U. Railway Timetabling Using Lagrangian Relaxation / U. Brannlund, P. O. Lindberg, A. Nou, J. E. Nilsson // Transportation Science. – 1998. – Vol. 4. – № 32. – С. 358–369.
 53. Сидоренко, В. Г. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов / В. Г. Сидоренко, К. М. Филиппченко // Информатизация образования и науки М.: ФГАУ ГНИИ ИТТ "Информика". – 2015. – Vol. 4. – № 28. – С. 123–132.
 54. Pinedo, Michael L. Scheduling Theory, Algorithms and Systems / Michael L. Pinedo // New York: Springer, 2008. – 671 с.
 55. Шубко, В. Г. Применение теории графов к конструкции и размещению железнодорожных станций : Учебное пособие / В. Г. Шубко // М. : МИИТ, 2005. – 32 с.
 56. Pellegrini, P. Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions / P. Pellegrini, G. Marlière, J. Rodriguez // Transport Res B-Meth. – 2014. – № 59. – С. 58–80.
 57. Rudan, J. Performance analysis of MILP based model predictive control algorithms for dynamic railway scheduling / J. Rudan, B. Kersbergen,

- T. van den Boom, K. Hangos // In proceedings of Control Conference (ECC). – 2013. – С. 4562–4567.
58. Лазарев, А. А. Целочисленные постановки задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения / А. А. Лазарев, Е. Г. Мусатова // Управление большими системами. – 2012. – № 38. – С. 161–169.
 59. Zhang, W. Study on internet of things application for highspeed train maintenance, repair and operation (MRO) / W. Zhang // Proceedings of the 2012 National Conference on Information Technology and Computer Science (CITCS 2012). – 2012. – № 8. – С. 8–12.
 60. Ярковская, Т. В. Оценка интеллектуального капитала организации / Т. В. Ярковская, А. Б. Письменная // Мир транспорта. – 2014. – Vol. 12. – № 5 (54). – С. 106–111.
 61. Lakin, I. The efficiency of the locomotive service / I. Lakin, I. Pustovoy // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2017. – № 6. – С. 16–25.
 62. Ковригина, И. В. Разработка и обоснование технологии сервисного технического обслуживания грузовых вагонов / И. В. Ковригина // Наука и техника транспорта. – 2018. – № 1. – С. 16–25.
 63. Bouillaut, L. Optimal Metro-Rail maintenance strategy using multi-nets modeling / L. Bouillaut, O. Francois, S. Dubois // International Journal of Performability Engineering. – 2012. – № 8. – С. 77–90.
 64. Soh, S. S. Review on scheduling techniques of preventive maintenance activities of railway / S. S. Soh, N. H. M. Radzi, H. Haron // Proceedings of International Conference on Computational Intelligence. – 2012. – С. 310–315.
 65. Конвей, Р. В. Теория расписаний / Р. В. Конвей, В. А. Максвелл, Л. В. Миллер // Москва: Наука, 1975. – 360 с.
 66. Lusby, R. M. Railway track allocation: Models and methods / R. M. Lusby,

- J. Larsen, M. Ehrgott, D. Ryan // OR Spectrum. – 2011. – Vol. 33. – № 4. – C. 843–883.
67. Saa, R. An ontology-driven decision support system for high-performance and cost-optimized design of complex railway portal frames / R. Saa, A. Garcia, C. Gomez, J. Carretero, F. Garcia-Carballeira // Expert System Application. – 2012. – № 39. – C. 8784–8792.
 68. SISCOG .Optimising the resources of the world [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siscog.eu/>.
 69. Carey, M. A model, algorithms and strategy for train pathing / M. Carey, D. Lockwood // The Journal of Operational Research Society. – 1995. – Vol. 8. – № 46. – C. 988–1005.
 70. Ahmad, S. S. Development of a unified railway track stability management tool to enhance track safety / S. S. Ahmad, N. K. Nirmal, K. Mandal, G. Chattopadhyay, J. Powell // P I Mech Eng F-J Rai. – 2013. – C. 493.
 71. Harbering, J. Single Track Train Scheduling / J. Harbering, A. Ranade, M. Schmidt // Proceedings of the 7th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA 2015). – 2015. – C. 102–117.
 72. Operations & Maintenance Peer Review. California High Speed Train Project [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.hsr.ca.gov/docs/about/business_plans/BPlan_2012LibraryCh6Peerreview.pdf.
 73. Disser, Y. Scheduling Bidirectional Traffic on a Path / Y. Disser, M. Klimm, E. Lubbecke // In Proceedings of the 42nd International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP). – 2015. – C. 406–418.
 74. Zhao, J. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow // Rail Rapid Transit. – 2009. – № 223. – C. 533–541.
 75. Albrecht, A. R. Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search / A. R. Albrecht, D. M. Panton, D. H. Lee //

- Computers and Operations Research. – 2013. – № 40. – С. 703–712.
76. Mišauskaitė. Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule” in: Automatizavimas, Rototechnika/ Mišauskaitė // Electronic and electrical engineering. – 2006. – Vol. 125. – № 7(71). – С. 43–46.
 77. Gafarov, E. R. Two-Station Single-Track Railway Scheduling Problem With Trains of Equal Speed / E. R. Gafarov, A. Dolgui, A. A. Lazarev // Computers and Industrial Engineering. – 2015. – С. 260–267.
 78. Лакин, И. К. Модель управления рисками отказов локомотивов / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников // Мир транспорта. – 2013. – Vol. 11. – № 4 (48). – С. 130–136.
 79. Schöbel, A. Operational fault states in railways / A. Schöbel, T. Maly // European Transport Research Review. – 2012. – № 4. – С. 107–113.
 80. Palte, M. H. A. Smartfleet, how “smart” rail vehicles help improve business / M. H. A. Palte // 5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011). – 2011. – С. 1–4.
 81. Sauder, R. L. Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization / R. L. Sauder, W. M. Westerman // Interfaces. – 1983. – Vol. 6. – № 13. – С. 24–37.
 82. Li, D. Relating track geometry to vehicle performance using neural network approach / D. Li, A. Meddah, K. Hass, S. Kalay // P I Mech Eng F-J. – 2006. – С. 273.
 83. Зак, Ю. А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок / Ю. А. Зак. Москва: Книжный дом «Либроком», 2011. – 394 с.
 84. Баранов, Л. А. Тренажер поездного диспетчера линии метрополитена / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов, Д. Б. Васьков // Вестник РГРТУа. – 2012. – № 10. – С. 32–35.
 85. Балакина, Е. П. Автоматика выполняет функции диспетчера / Е. П. Балакина // Мир транспорта. – 2008. – № 2. – С. 104–109.

86. Мелёшин, И. С. Модули и алгоритмы автоведения / И. С. Мелёшин, Ж. Ж. Калиев, Д. Т. Шабданов // Мир транспорта. – 2010. – Vol. 8. – № 3 (31). – С. 138–144.
87. Чжо, М. А. Исследование централизованных алгоритмов управления движением поездов на линии метрополитена, базирующихся на графических принципах / М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2014 «Наука МИИТа – транспорту». – В двух частях. – Часть 1– М.: МГУПС (МИИТ). – 2014. – С. III. 113–114.
88. Моисеев, А. А. Оптимальное управление при дискретных управляющих воздействиях / А. А. Моисеев // Автоматика и телемеханика. – № 9. – С. 123–132.
89. Чжо, М. А. Применение теории графов к планированию движения поездов метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // V Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2016». – М.: НИИАС. – 2016. – С. 131–134.
90. Баранов, Л. А. Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Железные дороги мира. – 2002. – № 8. – С. 64–69.
91. Логинова, Л. Н. Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения / Л. Н. Логинова // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 1. – С. 62–65.
92. Баранов, Л. А. Многофункциональные модели систем управления / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Е. В. Ерофеев, В. Г. Сидоренко // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 2. – С. 79–82.
93. Баранов, Л. А. Внедрение энергосберегающих технологий / Л. А. Баранов, Д. В. Гаев, А. В. Ершов, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин

// Мир транспорта. – 2010. – Vol. 31. – № 3. – С. 3–8.

94. Баранов, Л. А. Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена / Л. А. Баранов, М. А. Васильева, А. В. Ершов, В. М. Максимов, И. С. Мелёшин // Вестник МИИТа. – М.: МИИТ. – 2008. – № 19. – С. 3–10.
95. Моисеев, А. А. Энергетически оптимальное управление движением подвижного состава с дискретным регулированием силы тяги / А. А. Моисеев // Межвузовский сб. науч. тр. – М.: МИИТ. – 1989. – № 811. – С. 15–19.
96. Сидоренко, В. Г. Влияние планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на режим работы системы тягового электроснабжения / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Электроника и электрооборудование транспорта М: НПО ТЭЗ. – 2014. – № 1. – С. 10–13.
97. Сидоренко, В. Г. Методика автоматизация построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, М. А. Чжо, А. С. Петров // Транспорт и образование: Актуальные вопросы и тенденции. – 2015. – С. 74–80.
98. Тишкин, Е. М. Автоматизированная разработка графика движения поездов / Е. М. Тишкин, Г. И. Державец // Железнодорожный транспорт. – 1985. – № 6. – С. 41–43.
99. Тишкин, Е. М. Автоматизированный расчет графиков движения поездов метрополитена / Е. М. Тишкин, А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 2. – С. 8–9.
100. Баранов, Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко, Е. Г. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 3. – С. 35–41.
101. Козлов, В. П. Методы управления линией метрополитена на основе формального представления диспетчерских знаний с помощью

- ассоциативных схем : методические указания / В. П. Козлов. М.: ВНИИЖТ, 1985. – 14 с.
102. Чжо, М. А. Методы повышения безопасности движения поездов метрополитена для условий строящегося метрополитена г. Янгона (Республика Мьянма) / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – С. III. 21.
 103. Астрахан, В. И. Алгоритмизация процесса составления графика движения поездов / В. И. Астрахан, А. И. Жербина // Тр. МИИТа. – 1975. – №. 492. – С. 98–108.
 104. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J. H. Holland // The MIT press, 1992. – 232 с.
 105. Mitchell, M. An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell // London: MIT Press, 1999. – 162 с.
 106. AI Portal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/genetic-algorithms/basic-concepts.html>.
 107. Goldenberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning / D. E. Goldenberg // Addison-Wesley, 1989. – 432 с.
 108. Gwiazda, T. Genetic Algorithms Reference / T. Gwiazda // TOMASZGWIAZDA, 2006. – 412 с.
 109. Чжо, М. А. Применение методов искусственного интеллекта к решению задач планирования перевозочного процесса метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Труды всероссийской научно-практической конференции «Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях». – 2017. – С. 197–201.
 110. Michalewicz, Z. Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs / Z. Michalewicz // Springer, 1996. – 388 с.
 111. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие

- системы = Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. 2nd ed. Москва: Горячая линия-Телеком, 2008. – 452 с.
112. Караева, М. Р. Оптимизация организации и управления системой пассажирских перевозок транспортным предприятие / М. Р. Караева, Н. В. Напхоненко // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института). – 2015. – № 2. – С. 29–32.
 113. Хаоюань, Л. Многоступенчатый генетический алгоритм для предварительной сортировки контейнеров / Л. Хаоюань, С. Донгши // Мир транспорта. – 2015. – Vol. 13. – № 5. – С. 6–15.
 114. Tormos, P. A Genetic Algorithm for Railway Scheduling Problems / P. Tormos, A. Lova, F. Barber, L. Ingolotti, M. Abril, M. A. Salido // Studies in Computational Intelligence : Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications. – 2008. – Vol. 128. – С. 255–276.
 115. Sheng, S. Genetic Algorithm for the Transportation Problem with Discontinuous Piecewise Linear Cost Function / S. Sheng, Z. Dechan, X. Xiaofei // International Journal of Computer Science and Network Security. – 2006. – Vol. 6. – № 7(A). – С. 182–190.
 116. Антонова, А. С. Многокритериальное принятие решений в условиях риска на основе интеграции мультиагентного, имитационного, эволюционного моделирования и численных методов / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Vol. 2. – № 4.
 117. Миронов, С. В. Генетические алгоритмы для сокращения диагностической информации / С. В. Миронов, Д. В. Сперанский // Автоматики и телемеханика. – 2008. – № 7. – С. 146–156.
 118. Сперанский, Д. В. Генетический алгоритм размещения контрольных точек в цифровом устройстве / Д. В. Сперанский // Известия Саратовского

- университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2017. – Vol. 17. – № 3. – С. 353–362.
119. Mir, A. Genetic algorithms and their applications: an overview [Электронный ресурс] / A. Mir, D. P. Iquebal // – 2006. – Режим доступа: [http://www.iasri.res.in/seminar/AS-299/ebooks/2005-2006/phd/trim2/3.%20genetic%20algorithms%20and%20their%20ap plications-asif.pdf](http://www.iasri.res.in/seminar/AS-299/ebooks/2005-2006/phd/trim2/3.%20genetic%20algorithms%20and%20their%20applications-asif.pdf)
 120. Tim, G. A. A Genetic Algorithm for Drawing Undirected Graphs / G. A. Tim // Divulgaciones Matematicas. – 2001. – Vol. 9. – № 2. – С. 155–171.
 121. Hindi, M. M. Genetic algorithm applied to the graph coloring problem / M. M. Hindi, R. V. Yampolskiy // Proceedings 23rd Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference. – 2012. – С. 61–66.
 122. Жербина, А. И. Расчет на ЭВМ графика оборота составов метрополитена / А. И. Жербина // Тр. МИИТа. – 1978. – № 612. – С. 100–105.
 123. Ismail, H. T. Incremental assignment problem / H. T. Ismail, U. Gokturk // Information Sciences. – 2007. – № 177(6). – С. 1523-1529.
 124. Пазойский, Ю. О. Задача о назначении со специальной матрицей стоимостей / Ю. О. Пазойский // Труды : Сборник научных трудов : Применение математических методов в задачах, связанных с функционированием транспортных систем / Под ред. Л.Е. Садовского. - М. : МИИТ. – 1971. – № 385. – С. 77–86.
 125. Шубко, В. Г. Выбор числа и назначения пассажирских поездов для графика движения / В. Г. Шубко // МИИТ. Труды : Сборник научных трудов : Проблемы совершенствования перевозочного процесса на железнодорожном транспорте / Под общ. ред. Ф.П. Кочнева. М.:МИИТ. – 1979. – № 645. – С. 114–121.
 126. Railway technical webpages [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.railway-technical.com/train-maint.shtml>.
 127. Оре, О. Теория графов / О. Оре // Либроком, 2009. – 354 с.

128. Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари // Мир, 1973. – 405 с.
129. Белман, Р. Э. Динамическое программирование / Р. Э. Белман // М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
130. Чжо, М. А. Автоматизированное управление безопасностью эксплуатации электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Труды XXIV международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М.: РГГУ. – 2016. – С. 202–205.
131. Стандарт ИСО 9004-1-94. Управление качеством и элементы системы качества (п.5.1.1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stroimdom.com.ua/files/docs/iso-9004-1-94.pdf>.
132. Замышляев, А. М. Управление ресурсами, рисками на этапах жизненного цикла и анализ надежности (Проект УРРАН) / А. М. Замышляев // VI Международная научно-практическая конференция «Системы безопасности на транспорте» - Чешская Республика, Прага. – 2011. – С. 37–42.
133. Буч, Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, И. Якобсон // ДМК пресс, 2006. – 496 с.
134. Сафронов, А. И. Сценарное пространство построения планового графика движения поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 1. – С. 51–56.
135. Гамма, Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Д. Влиссидес. Питер: СПб, 2012. – 366 с.
136. Чжо, М. А. Применение шаблона проектирования MVC при разработке АСУТП / М. А. Чжо, К. М. Филиппченко // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2013 «Наука МИИТа – транспорту». –М.: МГУПС (МИИТ). – 2013. – С. III. 31.

137. Сидоренко, В. Г. Автоматизация построения планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 2. – С. 6–10.
138. Сафронов, А. И. Систематизация способов отображения информации планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. В. Ковалёв // Инновационные технологии в автоматике, информатике и телекоммуникациях : труды Международной конференции ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки. – 2008. – С. 244–248.
139. Чжо, М. А. Автоматизированная обработка данных о ночной расстановке составов на линии метрополитена / М. А. Чжо, С. Д. Левкачёв, А. С. Бурляев // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2016». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – С. III. 60.
140. Чжо, М. А. Автоматизация планирования ночной расстановки составов на линии метрополитена / М. А. Чжо, А. С. Бурляев // Труды всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2017». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2017. – С. III.13–14.
141. Теега, Г. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира / Г. Теега, С. Власенко. М.:Интекст, 2010. – 496 с.
142. Джереми, С. C++ Boost Graph Library / С. Джереми, Л. Лай-Кван, Л. Эндро // СПб: Питер, 2006. – 304 с.
143. Кормен, Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн // Москва: Вильямс, 2012. – 1328 с.
144. Graph visualization Software [Электронный ресурс].– 2014. – Режим доступа: <https://www.graphviz.org/>
145. Чжо, М.А.. Применение матричного способа описания графов при автоматизированном управлении ночной расстановкой составов на линии метрополитена / М. А. Чжо // Труды всероссийской научно-практической

- конференции «Неделя науки-2018». – М.: РУТ (МИИТ). – 2018. – С. III.122–123.
146. Чжо, М. А. Автоматизированное управление безопасностью при ночной расстановке состава на линии метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Труды XXV международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М.: РГГУ. – 2017. – С. 554–557.
 147. Размещение : Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Размещение>.
 148. Чжо, М. А. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, В. М. Алексеев, Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский // Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 73–76.
 149. Абдуллаев, И. С. Перспективы развития пассажирских станций / И. С. Абдуллаев. – 2015. – № 5. – С. 160–164.
 150. Гончаров, Д. В. Эффект предузловых станций: обоснование показателей / Д. В. Гончаров // Мир транспорта. – 2012. – № 1. – С. 110–116.
 151. Чжо, М. А. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, К. М. Филиппченко // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 19–25.
 152. Форд, Л. Р. Потоки в сетях / Л. Р. Форд, Д. Р. Фалкерсон // Москва: Мир, 1966. – 276 с.
 153. Чжо, М. А. Автоматизация планирования обслуживания электроподвижного состава / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // «Интеллектуальные системы управления на железноVI Международная научно-техническая конференция железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2017». – М.:НИИАС. – 2017. – С. 200–205.

154. Чжо, М. А. Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 13–16.
155. Чжо, М. А. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 6. – С. 37–40.
156. Чжо, М. А. Планирование работы электроподвижного состава метрополитена по различным критериям / М. А. Чжо, П. В. Козлов // Труды всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2017». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2017. – С. III. 44–45.
157. Чжо, М. А. Автоматизация планирования работы электроподвижного состава метрополитена как средство снижения рисков нарушений безопасности движения / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: РУТ (МИИТ). – 2017. – С. I. 23.
158. Obitko, M. Genetic algorithms [Электронный ресурс] / M. Obitko // – Режим доступа: <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/index.php>.
159. Chapra, S. C. Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists / S. C. Chapra // 3rd ed. McGraw-Hill, 2012. – 673 с.
160. MathWorks [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>.
161. Чжо, М. А. Построение планового графика движения транспортных средств и теория графов / М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2016». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – С. III. 112.
162. Чжо, М. А. Применение матричного способа описания графов при

автоматизированном управлении ночной расстановкой составов на линии метрополитена / М. А. Чжо // Труды всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2018». – М.: РУТ (МИИТ). – 2018. – С. III.122–123.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Государственное унитарное предприятие города Москвы
«Московский ордена Ленина и ордена Трудового
Красного Знамени метрополитен имени В. И. Ленина»
(ГУП «Московский метрополитен»)

Служба движения

Проспект Мира, д. 41, стр. 2, Москва, 129110
Тел: 8 (495) 688-01-10 Факс: 8 (495) 688-01-11
www.transport.mos.ru, www.mosmetro.ru, sds@mosmetro.ru

от _____ № _____
На № _____ от _____

АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы

Чжо Мин Аунг

«Автоматизация планирования движения поездов для условий строящегося метрополитена г. Янгона (Республика Мьянма)»

Предложенная автором методология автоматизации планирования перевозочного процесса метрополитена, в основе которой лежат декомпозиция задач и разработка моделей процессов бизнес-логики;

- автоматизированы процедуры, входящие в состав системы, которые ранее выполнялись в неавтоматизированном режиме, а именно:
 - определение последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, результаты которого используются в ходе автоматизированного построения процессов ухода на ночную расстановку составов и выхода из нее;
 - построение графика оборота электроподвижного состава.

Разработанные автором принципы построения системы, формализации, алгоритмы и модели являются основой для создания универсального для различных линий математического и программного обеспечения, а также базы данных системы, что имеет особую актуальность для условий строящегося метрополитена.

Основные результаты диссертационной работы Чжо Мин Аунга могут найти применение в автоматизированной системе построения планового графика движения пассажирских поездов по линиям Московского метрополитена.

И.о. начальника Службы движения



Д.В. Бузанов

19.07.2018

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор РУТ (МИИТ)

д.т.н., профессор



В.В. Виноградов

« 5 » ноября 2018 г.

СПРАВКА

о практическом использовании результатов диссертационной работы
Чжо Мин Аунг

«Совершенствование методов автоматизированного планирования
движения поездов в условиях развивающихся метрополитенов»

Результаты, полученные Чжо Мин Аунг в диссертационной работе, используются

– в методическом обеспечении дисциплин «Системы автоведения поездов», «Автоматизированные системы управления движением поездов», «Автоматизированные информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте»;

– в ходе научно-исследовательской работы и подготовки выпускных квалификационных работ по направлениям подготовки 27.03.04 – «Управление в технических системах» (профиль «Управление и информатика в технических системах», бакалавриат) и 27.04.04 – «Управление в технических системах» (программа «Управление и информатика в технических системах», магистратура);

– в учебном пособии «Методы оптимизации» (авторы Сафронов А.И., Сидоренко В.Г., Федянин В.П., Филиппченко К.М., Чжо М.А.) изданном в РУТ (МИИТ) в 2017 г.

Заведующий кафедрой «Управление и
защита информации»,
д.т.н., профессор

Л.А. Баранов

Ученый секретарь кафедры «Управление и
защита информации»,
к.т.н., доцент

А.И. Сафронов