

На правах рукописи



Чжо Мин Аунг

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

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) на кафедре «Управление и защита информации».

Научный **Сидоренко Валентина Геннадьевна**

руководитель: доктор технических наук, профессор

Официальные **Годяев Александр Иванович**

оппоненты: доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», заведующий кафедрой;

Швалов Дмитрий Викторович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС), кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», доцент

Ведущая Федеральное государственное бюджетное образовательное организация: учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС).

Защита диссертации состоится 13 февраля 2019 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.14 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, ГСП–4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) www.miit.ru.

Автореферат разослан __ декабря 2018 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 218.005.14,

д.т.н., профессор

В.Г. Сидоренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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 автоматизации 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 развивающейся линии метрополитена.

- Показано влияние параметров ГА на решение задачи построения ГО.

Теоретическая и практическая значимость работы 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 задач пользователей средств автоматизации, возникающих в ходе развития метрополитена.

- 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).

Методология и 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» (РУТ(МИИТ) 2016-2017 г.г.), на четырёх научно-практических конференциях «Неделя Науки» (РУТ(МИИТ), 2014-2017 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 «Управление и защита

информации». 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, определены цель и задачи исследования.

В первой главе систематизированы работы российских и зарубежных авторов, посвященные вопросам автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитенах. 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. Приведены примеры эффективного использования теории графов и ГА, которые составляют основу разработанных в ходе диссертационного исследования математических методов решения задач управления транспортными системами.

Вторая глава посвящена декомпозиции процесса сбора и анализа данных ПГД и ГО.

По аналогии с понятием жизненного цикла любого изделия введено понятие жизненного цикла ПГД и ГО, разработана его V-образная модель.

В ходе диссертационного исследования разработаны модели трех процессов, входящих в жизненный цикл ПГД и ГО:

- модель процесса подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО;
- модель процесса автоматизированного построения ПГД и ГО;
- модель процесса автоматизированного анализа и передачи ПГД и ГО заинтересованным службам.

Разработанные модели процессов являются основой для разработки средств автоматизации и автоматизированного построения ПГД и ГО.

Процесс автоматизированного построения ПГД и ГО реализует рекурсивную процедуру исполнения сценариев построения процессов ПГД, которая включает в себя алгоритмы, разработанные Власовой И.А., Новиковой М.В., Рындиной Е.Ю., Сафронова А.И., Сидоренко В.Г., Федорова А.В. и др.

В ходе анализа процессов подготовки исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО и их автоматизированного построения 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 решения поставленной задачи после рассмотрения меньшего числа вариантов, и повысить качество ПГД.

2. Задача сокращения времени, затрачиваемого на построение прототипа ГО, в силу того, что в процессе согласования ПГД и ГО может возникнуть необходимость неоднократной модификации прототипа ГО с учетом изменения исходных данных.

Решению этих задач посвящены 3 и 4 главы диссертации.

На Рисунке 1 представлена разработанная автором структура Представления для «АРМ Графиста – 2», реализация которой позволяет эффективно выполнять процессы, входящие в жизненный цикл ПГД и ГО.



Рисунок 1 – Структура Представления для «АРМ Графиста – 2»

В третьей главе рассмотрены вопросы определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов, уход на которую является ключевым процессом построения ПГД, и разработаны следующие алгоритмы:

– 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 ребро, соответствующее единственному возможному пути от истока к вершине, и множество исходящих ребер, соответствующих всем ветвлениям пути; при таком объемном представлении информации не требуется ее дополнительная обработка при 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 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, что отражено на Рисунке 2.



Рисунок 2 – 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 алгоритмов поиска в ширину, поиска в глубину и

топологической сортировки вершин графа с учетом всех возможных перестановок вершин и ограничений на последовательность прохождения вершин.

На Рисунке 3 показаны стадии автоматического преобразования информации на примере двухстрелочной станции. Выбор данного примера обусловлен ограниченным объемом автореферата. Разработанные алгоритмы могут быть использованы для различных схем станции. В диссертации приведены стадии преобразования информации для двух-трёх-четырёх-шести-стрелочных станций, существующих на Московском метрополитене.

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.

Каждая третья или четвертая вершина дерева является стоком дерева. Число стоков равно числу возможных последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов. Мощность множества вершин дерева растёт с увеличением числа стрелочных переводов на станции и может превышать числа 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.

Информация, представленная в форме графов, может быть также представлена в форме таблиц. Разработан алгоритм, позволяющий преобразовать матрицу смежностей графа, полученного после удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам, в матрицу смежностей «уплотненного» графа, что иллюстрирует Рисунок 4. Исходный граф является подграфом уплотненного. Ребра, добавленные в граф в ходе перехода от исходного графа к уплотненному, выделены пунктиром. Схема алгоритма представлена на Рисунке 5.

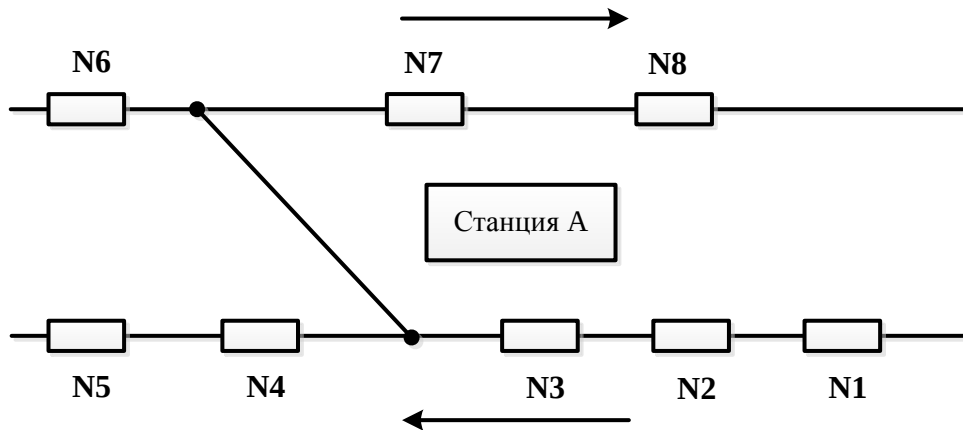
Разработанные алгоритмы включены в состав программного обеспечения автоматизированной системы «АРМ Графиста – 2.0». Показано соответствие результатов работы созданных алгоритмов данным реальных ПГД, частный пример которого представлен на Рисунке 6.

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

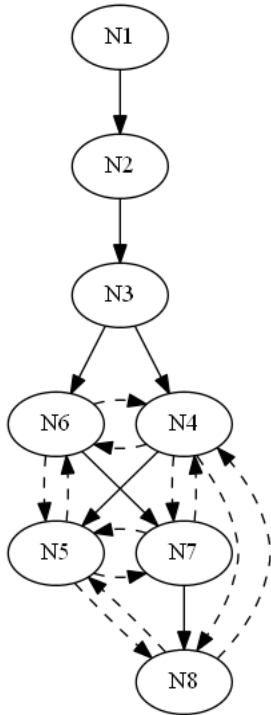
В процессе автоматизированного построения ПГД и ГО первым подпроцессом, реализующим преобразование данных, является подпроцесс построения прототипа ГО.

Рисунок 3 –Стадии преобразования информации для двухстрелочной станции

а)



б)



в)

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

г)

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

Рисунок 4 – Организация ночной расстановки составов. а – схема организации ночной расстановки составов на станции; б – «уплотненный» граф последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов; в – матрица смежностей графа, полученного после удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам; г – матрица смежностей «уплотненного» графа

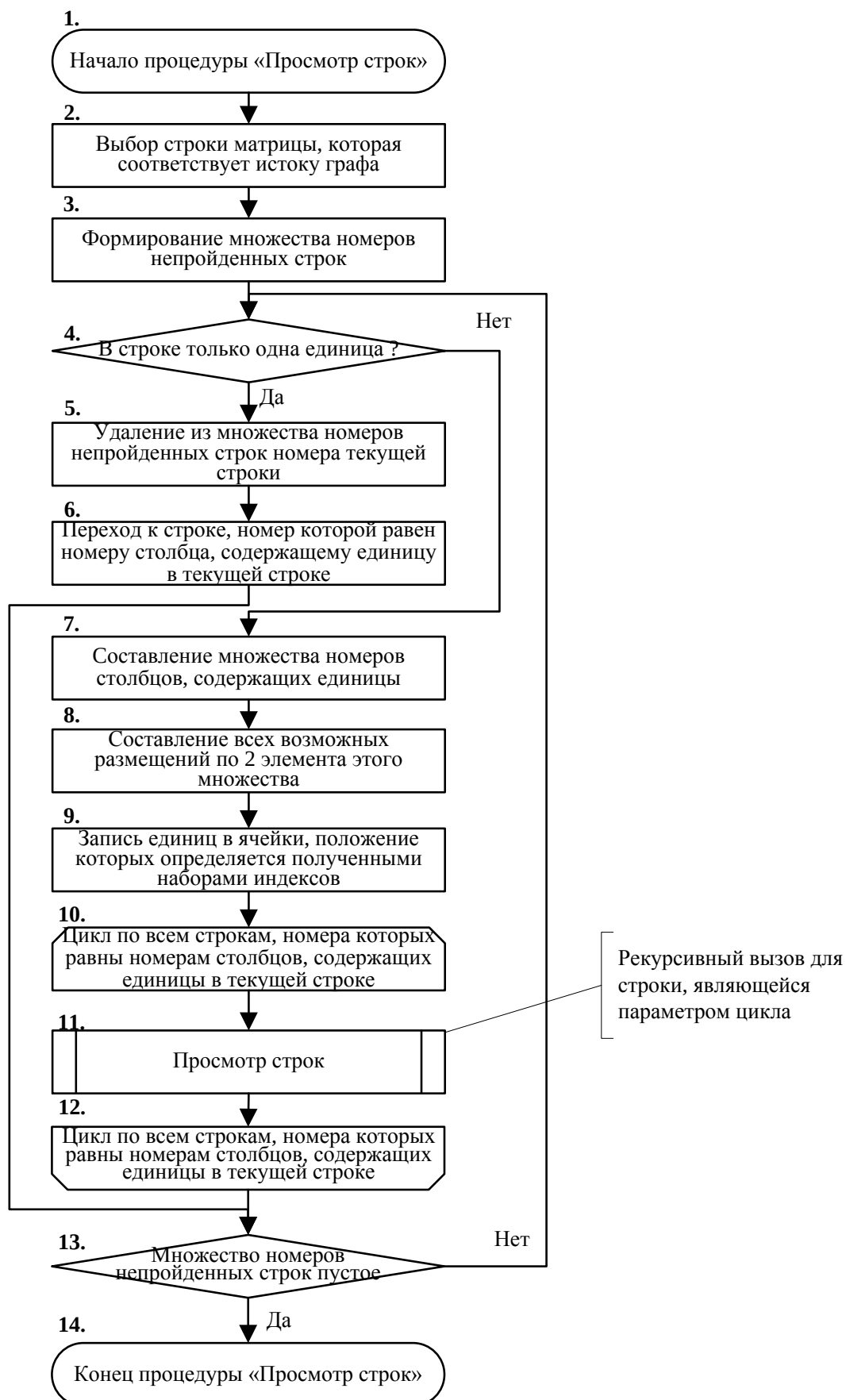


Рисунок 5 – Алгоритм преобразования матрицы смежностей графа

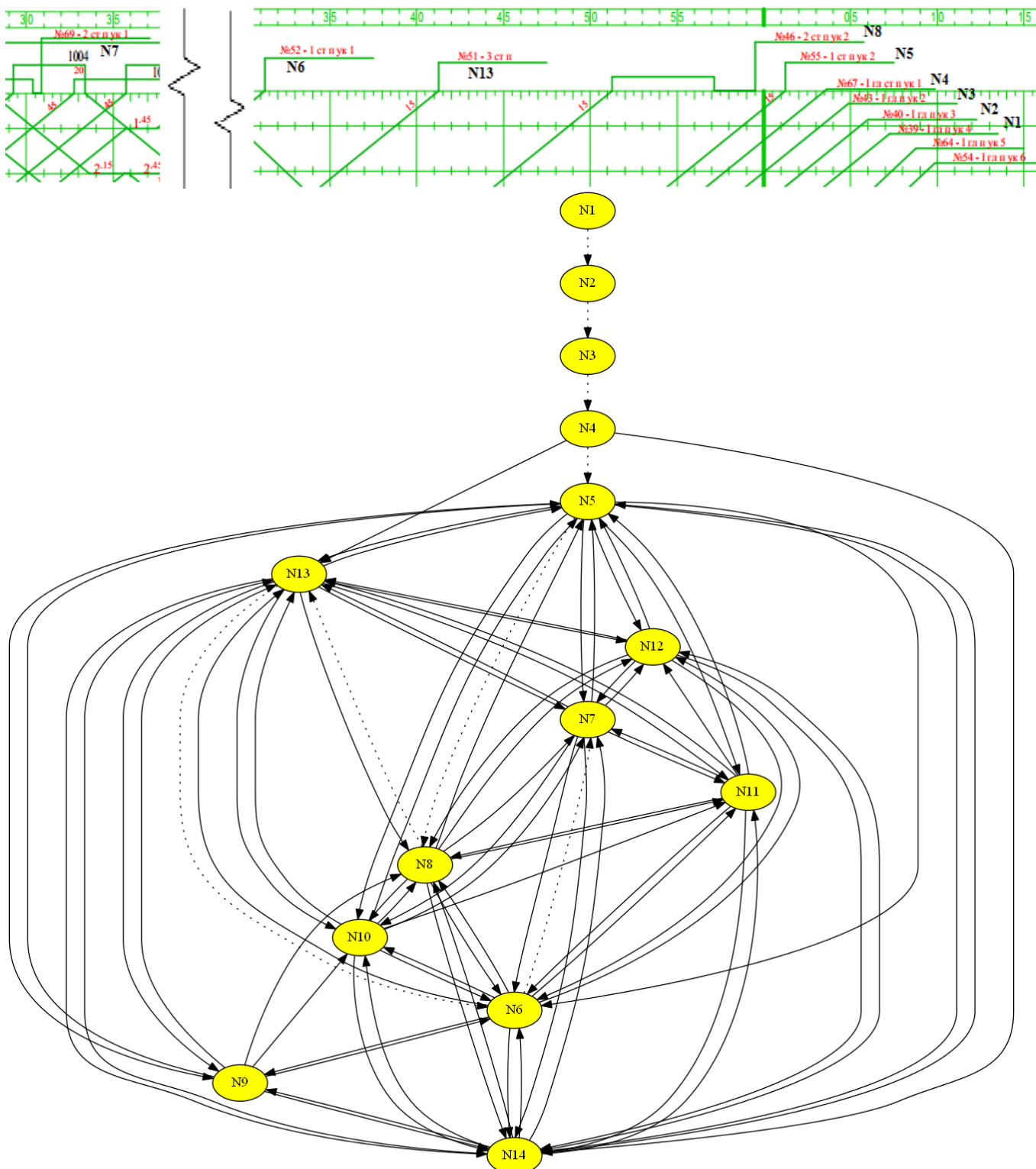


Рисунок 6 – Последовательность заполнения указателей ночной расстановки в рамках НПД для конечной шестистрелочной станции и «уплотненный» граф, полученный на основе информации для шестистрелочной станции. Пунктиром обозначены ребра, входящие в пути, соответствующие последовательности заполнения указателей ночной расстановки на приведенном фрагменте НПД

Решение этой задачи с использованием методов теории графов и принципа оптимальности Беллмана дает возможность получить всё множество допустимых назначений осмотров и выбрать то, которое, с одной стороны, будет

соответствовать ПГД, а с другой – минимально отличаться от оптимального по выбранному критерию равномерности. Оценка сверху мощности множества полученных вариантов построения ГО имеет порядок 10^9 . 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 в ходе выполненных автором исследований для решения задачи был применен ГА.

Ключевыми моментами использования ГА являются:

- описание хромосомы (вариант построения ГО, в котором каждому ремонту, который должен быть выполнен, поставлен в соответствие кандидат, который задает место и время его проведения);
- определение фитнес-функции (критерия выбора рационального решения) для каждой хромосомы в популяции (множество вариантов построения ГО, рассматриваемое на итерации эволюции);
- создание способов кроссинговера (основной генетический оператор, за счет которого производится обмен генетическим материалом между особями; в нашем случае – изменение номера кандидата, который назначен для выполнения ремонта), учитывающих особенности поставленной задачи.

Выбор фитнес-функции определяет множество аллелей (состояния генов (ген – кандидат, назначенный для выполнения ремонта), занимающих одни и те же локусы (локус – один из ремонтов, который должен быть выполнен и задает один элемент хромосомы) в хромосомах; в нашем случае – один из кандидатов, которые могут быть назначены для выполнения ремонта).

Если необходимое условие достаточности ресурсов при построения ГО выполняется, и фитнес-функция отражает равномерность проведения осмотров, то в качестве множества аллелей выступает множество кандидатов, доступных для исполнения осмотров.

В этом случае в качестве критерия рационального планирования графика оборота R_R может быть выбран минимум среднего значения квадрата отклонения времен начала осмотра для кандидата, используемого для проведения осмотра, от желаемых времен начала проведения осмотра:

$$R_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{c_i:N_r} (c_i:l_j:t_{des} - c_i:l_j:k:t_b)^2}{N_{\Sigma r} - 1} \rightarrow \min, \quad (1)$$

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

$c : N_r$ – необходимого числа осмотров 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 осмотр, с момента выхода из осмотра до момента захода в депо или между двумя осмотрами;

$\mathbf{c}_i : \mathbf{l}_j : t_{des}$ – желаемое время начала проведения осмотра, которое следует за звеном $\mathbf{c}_i : \mathbf{l}_j$ (время начала осмотра, при выполнении которого все осмотры 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 осмотра, соответствующего звену $\mathbf{c}_i : \mathbf{l}_j$;

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

$N_{\Sigma r}$ – сумма необходимого числа осмотров внутри всех рассматриваемых цепочек.

Использование этого критерия предполагает, что для каждого из задействованных в плане кандидатов и для каждого звена выполняются ограничения на выбор места проведения осмотра и периодичность проведения осмотров. В противном случае устанавливается «штрафное» значение критерия R_R , многократно превышающее значение $\mathbf{r} : P \times N_{\Sigma r}$, где $\mathbf{r} : P$ – допустимый интервал времени между двумя осмотрами; $N_{\Sigma r} = \sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c}_i : N_r$ – сумма необходимого числа осмотров внутри всех рассматриваемых цепочек.

Необходимым условием наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС для ситуации, когда составы находятся в движении с момента подачи напряжения на контактный рельс и до момента окончания движения по линии, является превышение числа кандидатов N_k над суммой необходимого числа осмотров внутри всех рассматриваемых цепочек $N_{\Sigma r}$ или равенство этих величин:

$$N_k \geq N_{\Sigma r} \quad (2)$$

Если это условие не выполняется, то в качестве фитнес-функции используется сумма квадратов превышений времени между ремонтами над допустимым интервалом времени между двумя осмотрами.

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. При невыполнении необходимого условия построения ГО (2), в случае наличия ограниченных ресурсов, может возникнуть такое превышение. Это необходимо учесть при построении ПГД путем уменьшения времени в движении между двумя осмотрами за счет ввода дополнительного отстоя, раннего ухода на ночную расстановку или более позднего выхода из нее.

На Рисунках 7-10 представлены результаты построения ГО для одной из линий Московского метрополитена с использованием разработанной СППР.

Данные, приведенные на графиках, позволяют проанализировать функционирование различных алгоритмов кроссинговера.

На Рисунке 7 представлены результаты построения ГО для случая, когда необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО выполняется и фитнес-функция отражает равномерность размещения осмотров. Рисунок позволяет сравнить ГО, соответствующий используемому на Московском метрополитене ПГД, и предложенный прототип. Данные о существующих осмотрах приведены в виде чёрных прямоугольников, а о предложенных – в виде серых 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» число 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 условия (2). Соответствующий ГО, при построении которого множество кандидатов, которые можно использовать для проведения осмотров, было сокращено вдвое, приведен на Рисунке 8. Построение ПГД без запрещенного превышения времени между ремонтами над допустимым 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. Нехватка ресурсов привела к тому, что на цепочке, состоящей из 10-14 маршрутов, разместилось вместо необходимых трех осмотров только два.

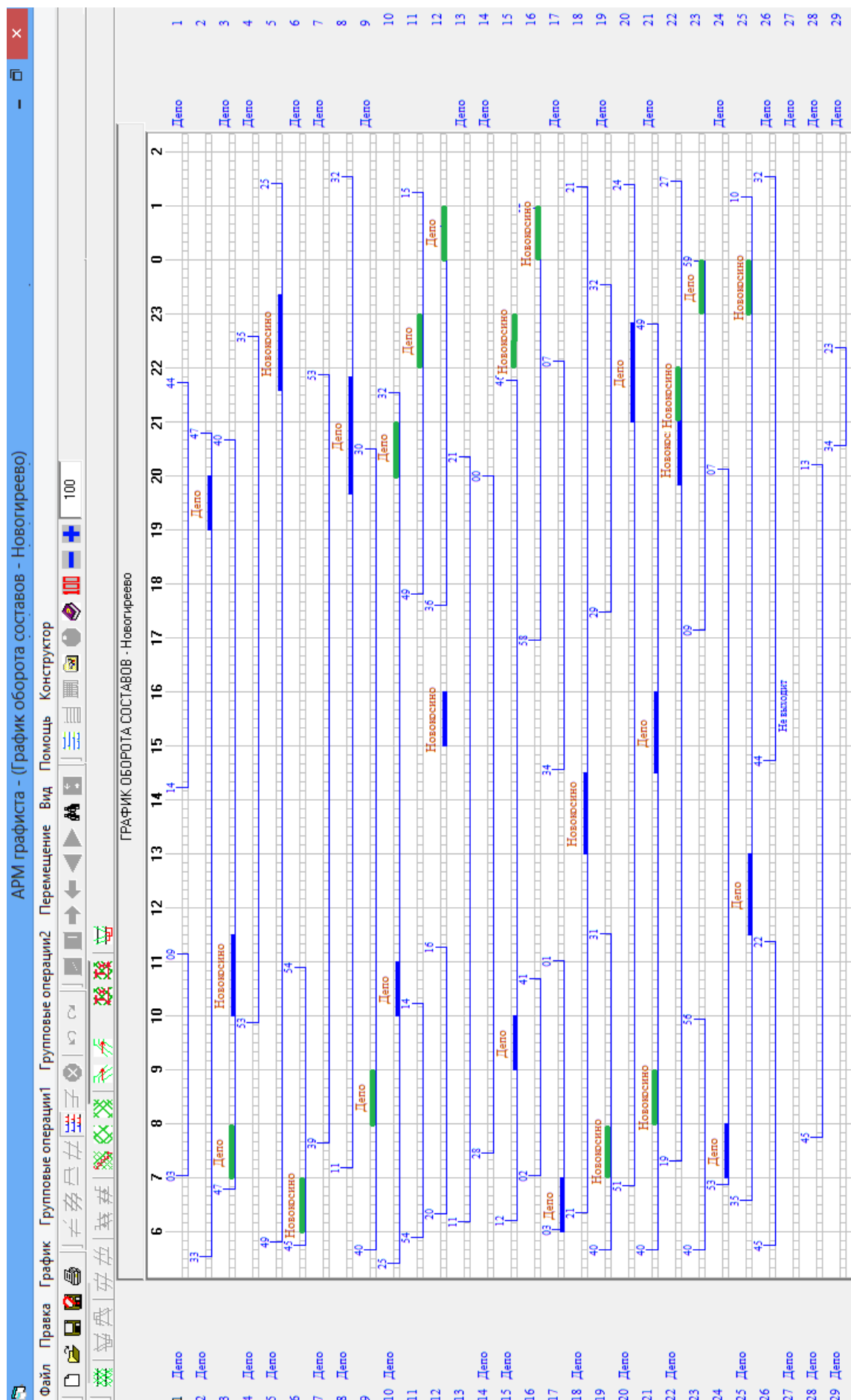


Рисунок 7 – Результаты построения ГО для случая, когда необходимое условие наличия достаточных ресурсов для построения ГО ЭПС выполняется

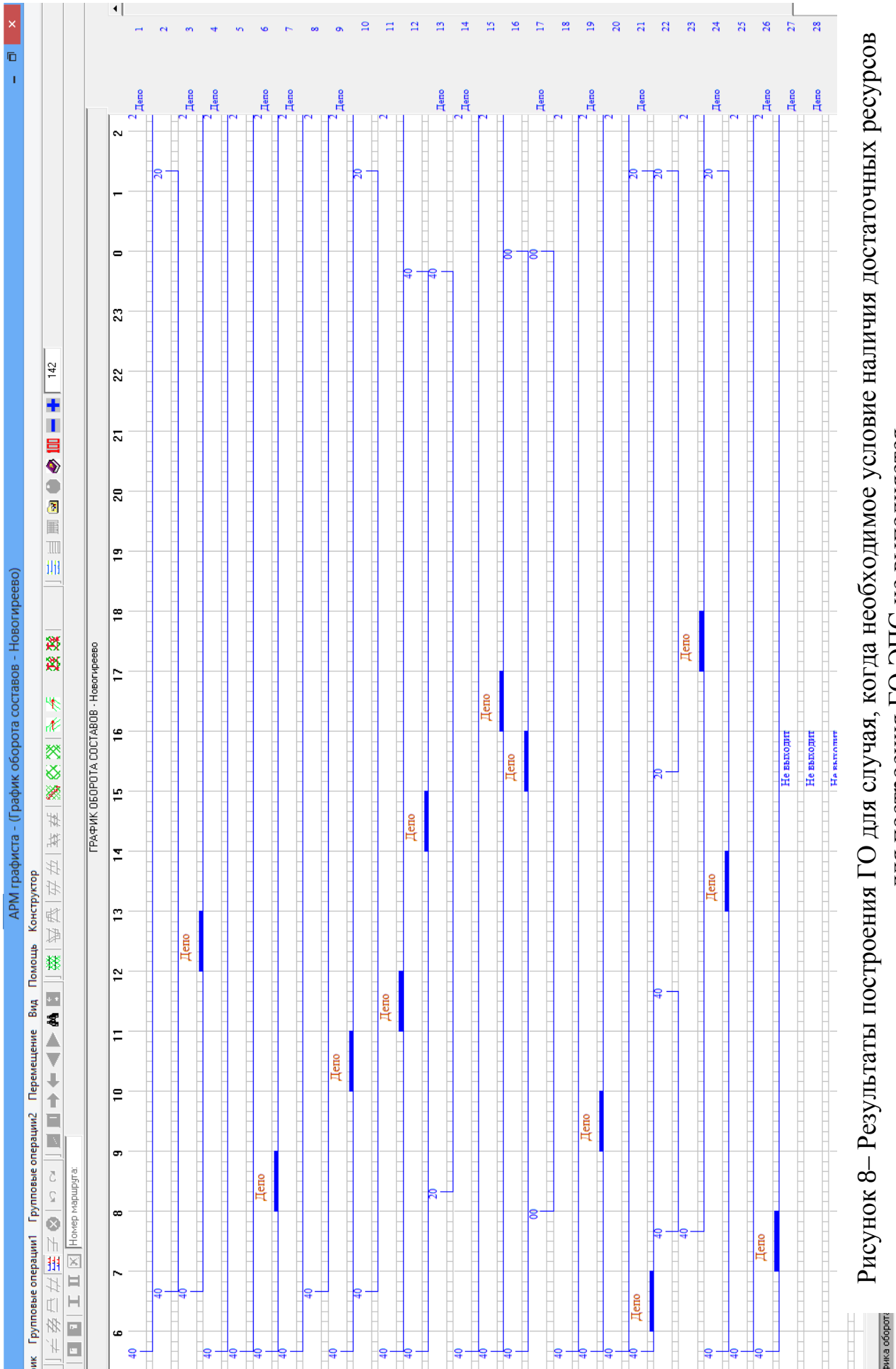


Рисунок 9 показывает, как меняется минимальное найденное значение фитнес-функции в ходе эволюции (процесс изменения множества рассматриваемых вариантов построения ГО). График отражает зависимость десятичного логарифма наилучшего в популяции значения фитнес-функции от номера итерации. Такой способ представления 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 осмотров, что приводит к резкому возрастанию значений фитнес-функции, которая в этой ситуации приравнивается к значению штрафной функции. 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.

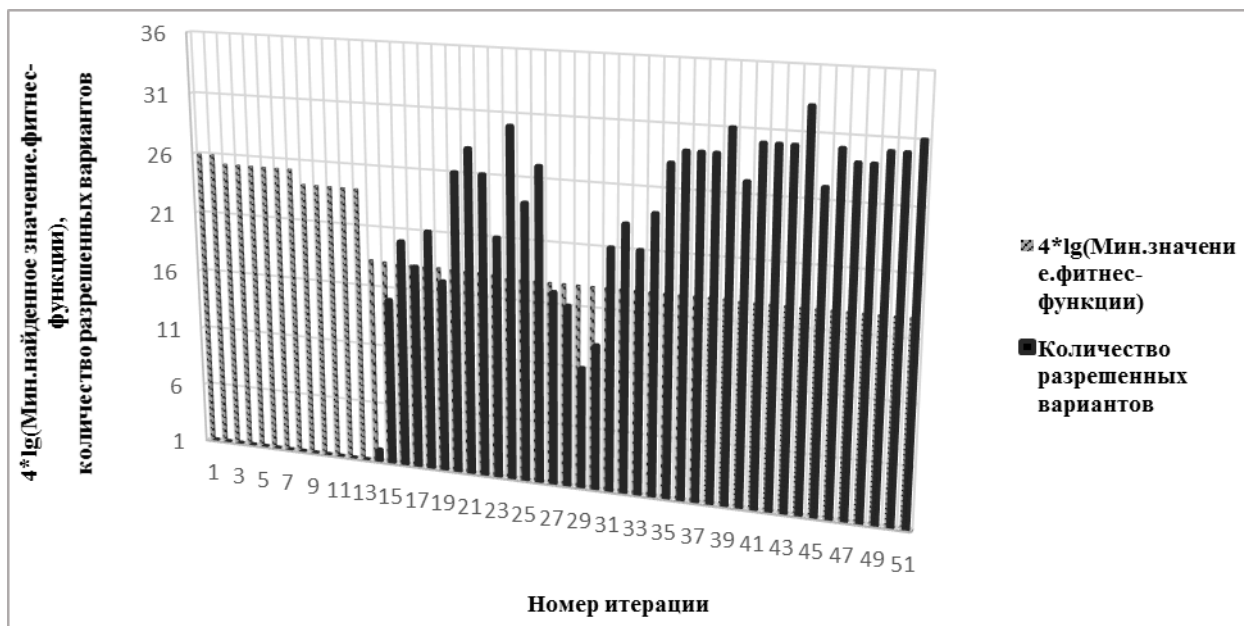


Рисунок 9 – Зависимость десятичного логарифма минимального найденного значения фитнес-функции и количества разрешенных вариантов в популяции от номера итерации

Рисунок 10 иллюстрирует 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 числа итераций. При этом различие между минимальными найденными значениями фитнес-функции при использовании различных алгоритмов кроссинговера сокращается. На основе известных (арифметического, эвристического и промежуточного) кроссинговеров автором формализованы и реализованы новые, в которых реализуется работа с аллелью не как со скаляром, а как с вектором.

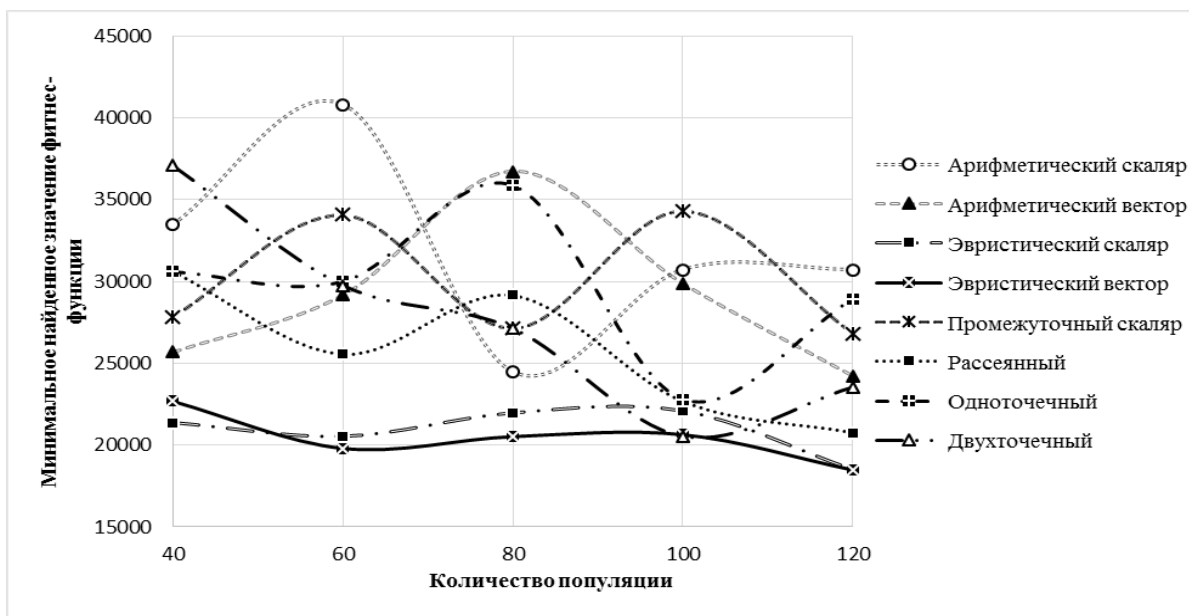


Рисунок 10 – Зависимость минимального найденного значения фитнес-функции от размера популяции и алгоритма кроссингвера

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, отделить 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 генетического алгоритма (ГА) к решению задач планирования 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 условиях наличия ограниченных ресурсов для реализации требований, предъявляемых к ПГД и ГО, что имеет особую актуальность в условиях развивающихся метрополитенов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

а) Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертации на соискание ученой степени

1. Сидоренко, В. Г. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2017. – №6. – С. 37–40.

2. Сидоренко, В. Г. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо, В. М. Алексеев, Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский // *Электротехника*. – 2017. – №12. – С. 73–76.

3. Сидоренко, В. Г. Применение современных технологий программирования к автоматизации планирования движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко, М. А. Чжо // *Автоматика на транспорте*. – 2016. – № 3, т.2. – С. 331-347.

4. Сидоренко, В. Г. Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2016. – №6. – С. 13-16.

5. Сидоренко, В. Г. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена / В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко, М. А. Чжо // *Электротехника*. – 2016. – №9. – С. 19–25.

б) Публикации в иных научных изданиях

6. 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.

7. Сидоренко, В. Г. Автоматизация планирования работы электроподвижного состава метрополитена как средство снижения рисков нарушений безопасности движения / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – С. I–23.

8. Бурляев, А. С. Автоматизация планирования ночной расстановки составов на линии метрополитена / А. С. Бурляев, М. А. Чжо // Труды всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2017». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2017. – С. III–13-14.

9. Козлов, П. В. Планирование работы электроподвижного состава метрополитена по различным критериям / П. В. Козлов, М. А. Чжо // Труды всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки-2017». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2017. – С. III–44-45.

10. Сидоренко, В. Г. Применение методов искусственного интеллекта к решению задач планирования перевозочного процесса метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Труды всероссийской научно-практической конференции «Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях». – 2017. – С. 197–201.

11. Сидоренко, В. Г. Автоматизация планирования обслуживания электроподвижного состава / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // VI научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2017». – М.: НИИАС. – 2017. – С. 200-205.

12. Сидоренко, В. Г. Автоматизированное управление безопасностью при ночной расстановке состава на линии метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Труды XXV международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М.: РГГУ. – 2017. – С. 554–557.

13. Сидоренко, В. Г. Методы повышения безопасности движения поездов метрополитена для условий строящегося метрополитена г. Янгона (Республика Мьянма) / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – С. III–21.

14. Левкачёв, С. Д. Автоматизированная обработка данных о ночной расстановке составов на линии метрополитена / С. Д. Левкачёв, А. С. Бурляев, М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2016». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – С. III–60.

15. 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.

16. Сидоренко, В. Г. Применение теории графов к планированию движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // V Международная научно-

техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2016». – М.: НИИАС. – 2016. – С. 131-134.

17. Сидоренко, В. Г. Автоматизированное управление безопасностью эксплуатации электроподвижного состава метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Труды XXIV международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М.: РГГУ. – 2016. – С. 202–205.

18. 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.

19. Чжо, М. А. Методика автоматизации построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / М. А. Чжо, А. С. Петров, В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Материалы международной научно-практической конференции «Транспорт и образование: актуальные вопросы и тенденции.» – ЧУПС УрГУПС 2015. – С. 74 – 80.

20. Чжо, М. А. Автоматизация исполнения императивов построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / М. А. Чжо // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2015 «Наука МИИТа – транспорту». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2015. – С. III–78-79.

21. Чжо, М. А. Исследование централизованных алгоритмов управления движением поездов на линии метрополитена, базирующихся на графиковых 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.

22. Чжо, М. А. Применение шаблона проектирования MVC при разработке АСУТП / М. А. Чжо, К. М. Филиппенко // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2013 «Наука МИИТа – транспорту». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2013. – С. III–31.

Чжо Мин Аунг

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

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

Подписано в печать _____.____. 2018 Заказ № _____ Формат 60x90/16
Тираж 80 экз. Усл. печ.л. 1,5

УПЦ ГИ РУТ(МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.