



Маркевич Агата Владимировна

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА РАБОТЫ
МАШИНИСТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сидоренко Валентина Геннадьевна

Официальные оппоненты: **Барский Аркадий Бенционович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное учреждение
«Центральный научно-исследовательский институт воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации»,
старший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного центра

Мехедов Михаил Иванович

кандидат технических наук,
акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», заместитель Генерального директора – директор научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения»

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

Защита состоится «27» декабря 2023 г., в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 40.2.002.05 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

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

Автореферат разослан «__» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Горелик Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Метрополитен – один из основных видов общественного транспорта, эксплуатируемый по всему миру. Московский метрополитен входит в десятку крупнейших по годовому пассажиропотоку метрополитенов (2560 млн чел.) наряду с Пекинским (3848 млн чел.), Токийским (3617 млн чел.) и Шанхайским (3401 млн чел.), а также является первым по интенсивности использования вне Азии. В Москве в течение 2023-2028 гг. планируется открытие до пятидесяти новых станций метро без учета станций Московских Центральных Диаметров.

При изменении парности движения поездов большая нагрузка ложится на подразделения, занимающиеся планированием и управлением движением электроподвижного состава (ЭПС), задача которых оперативно формировать или корректировать плановый график движения (ПГД) поездов. Отдельной задачей является формирование графика рабочих смен (РС), возможностей подмен и различных трудовых мероприятий для персонала, задействованного в эксплуатации метрополитена. График работы (ГР) машинистов метрополитена (ММ) строится на основании ПГД и графика оборота (ГО) ЭПС, учитывает численность сотрудников и их допустимую плановую загрузку. В реалиях Московского метрополитена построение ГР ММ производится для каждого депо отдельно. Выполняют эту работу инженеры, специализирующиеся в эксплуатации линии, обменивающиеся опытом и экспертными знаниями внутри трудового коллектива. Качество итогового результата связано с влиянием человеческого фактора. На текущий момент технологический процесс нельзя считать полностью унифицированным в рамках столичного метрополитена и можно говорить о потенциале его совершенствования.

Условия труда могут различаться для сотрудников, задействованных в движении ЭПС разных линий. Интерес представляет комплексная автоматизация планирования работы метрополитена и, в частности, автоматизация планирования работы машинистов метрополитена.

Существует ряд программ и методов, решающих задачу построения расписания при заданных начальных условиях. Каждый из них обладает преимуществами и недостатками, связанными в основном с ограниченной гибкостью ввода исходных значений и принципов расчета. Часть из них позволяет вести учет различных режимов труда, квалификации сотрудников разной специализации, перерывов в работе на отпуска и больничные.

При использовании существующих инструментов, особенно зарубежных, повышается риск несоблюдения локальных нормативных требований к работе сотрудников, связанный в том числе с техническими ограничениями программ. Под риском в работе понимается сочетание вероятности и последствий для проекта наступления неблагоприятных событий. Расширение стандартного функционала в рамках гибких решений, настраиваемых индивидуально в процессе внедрения, может

быть сопряжено со значительными финансовыми затратами. Таким образом, разработка интеллектуальной системы построения ГР ММ (ИСП ГР ММ), отличительной чертой которой является организация посменной работы в условиях, отнесенных к вредным условиям труда, связь с другими элементами интеллектуальной системы управления метрополитеном (ИСУМ), с ПГД и ГО ЭПС, является актуальной задачей на текущий момент и определяет своевременность проводимых исследований.

Степень разработанности. Задаче планирования и управления движением поездов метрополитена посвящено множество работ, в том числе российских авторов, таких как Балакина Е.П., Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф., Ерофеев Е.В., Ершов А.В., Козлов В.П., Логинова Л.Н., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г., Касьянов В.Н., Филипченко К.М. Среди зарубежных авторов можно выделить Белмана Р.Э., Дюбуа С., Чжан В., Чжо М.А. В своих работах авторы приводят анализ теоретических представлений и практических результатов использования математического аппарата: эвристических алгоритмов, графовых моделей, комбинаторной оптимизации и т.д.

Вопрос автоматизации ГР ММ не так широко освещен. Вопрос автоматизации ГР локомотивных бригад исследовали Бархатный В.Д., Бывшев С.А., Ладыгина В.И., Пазойский Ю.О., Шибяев Е.С. и др.

Объектом исследования в данной работе является разработка ГР ММ, а также создание и внедрение элементов интеллектуальных транспортных систем, для чего привлекаются проектные команды (ПрК), деятельность которых также необходимо планировать.

Предметом исследования выступает принцип интеллектуального управления рабочим временем ММ и сопутствующего персонала при учете реальных условий российских предприятий и различных режимов работы.

Целью работы является создание интеллектуальной системы для автоматизации построения рационального графика работы машинистов на основе накопленных данных с учетом требований нормативных документов.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. Анализ современного состояния вопроса, классификация задач планирования перевозочного процесса метрополитена и управления рабочим временем персонала в различных отраслях экономики, методов их решения и автоматизации.

2. Создание процедур построения графика посменной работы и определения числа основных и подменных ММ и их автоматизация, а именно:

- распределение рабочих смен согласно ПГД;
- формирование ГР основных и подменных ММ, исходя из РС и требований к организации работы согласно нормативным актам.

3. Создание автоматизированной процедуры построения ГР ПрК и определения их состава при реализации элементов ИСУМ. Проведение имитационных экспериментов с целью анализа качества функционирования разработанного ИО, МО и ПО построения ГР привлеченных для реализации элементов ИСУМ ПрК.

4. Создание информационного, математического и программного обеспечения (ИО, МО и ПО) ИСП ГР ММ для метрополитена, а также ГР ПрК при реализации элементов ИСУМ;

5. Проведение имитационных экспериментов с целью анализа качества функционирования разработанного ИО, МО и ПО ИСП ГР ММ.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Разработан принцип автоматизированного построения ГР основных и подменных ММ, позволяющая включить решение этой задачи в жизненный цикл автоматизированного планирования движения поездов и сформулировать задачи автоматизированного построения ГР ММ, отличающиеся от известных учетом требований к условиям работы сотрудников согласно локальным нормативным актам с помощью настраиваемых параметров ИСП ГР ММ.

2. Созданы рекурсивный и эвристический алгоритмы назначения основных ММ на РС и организации работы подменных ММ, которые позволяют повысить равномерность занятости ММ по сравнению с неавтоматизированным построением ГР.

3. Разработан принцип автоматизированного построения ГР ПрК при реализации элементов ИСУМ, отличающаяся от известных учетом особенностей их работы, а именно:

- последовательности выполнения задач;
- квалификации трудовых ресурсов и связанной с ней стоимости работ;
- одновременного выполнения задач несколькими участниками ПрК;
- выполнения нескольких задач одним участником ПрК;
- особенностями организации командной работы.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования:

1. Применение выбранных на основе выполненного анализа методов автоматизированного решения задач построения ГР ММ, реализованных в рамках ИСП ГР ММ, позволяет ускорить решение задачи повышения эффективности использования рабочего времени трудовых ресурсов.

2. Синтезированные процедуры автоматизированного построения графика посменной работы и определения числа основных и подменных ММ, реализованные в рамках ИСП ГР ММ, ускоряют сходимость решения по сравнению с методом полного перебора, учитывают локальные нормативные акты работы сотрудников метрополитена.

3. Синтезированные процедуры автоматизированного построения ГР ПрК, задействованных в создании элементов ИСУМ, в частности ИСП ГР ММ, повышают точность решения по сравнению с аналогами, а именно учитывают специфические особенности командной работы в отрасли информационных технологий, выявленные автором работы в ходе исследования.

4. Разработанное МО, ИО и ПО ИСП ГР ММ может стать составной частью ИСУМ для решения задач построения ГР ММ и решению других задач, связанных с

управлением и повышением эффективности использования рабочего времени персонала. Заложённая в основу ИСП ГР ММ возможность её адаптации к решению различных задач планирования загрузки персонала позволяет выполнить решение задач построения расписаний для сотрудников, работающих посменно и занятых проектной деятельностью по созданию элементов ИСУМ.

5. Сходимость результатов имитационных экспериментов и данных реальных ГР сотрудников для нескольких линий Московского метрополитена обеспечивает успешное функционирование ПО для различных линий метрополитена. Открытая архитектура ИСП ГР ММ позволяет оперативно расширять число используемых параметров входных данных для применения ПО на разных линиях метрополитена с учетом локальных особенностей планирования их работы, в том числе для Московского центрального кольца (МЦК). Разработанная методика может быть применена к решению различных задач управления рабочим временем персонала в будущих исследованиях.

Методология и методы исследования. Результаты диссертационной работы получены на основе использования теории управления, теории расписаний, теории графов, рекурсивных алгоритмов, генетических алгоритмов и методов имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Классификация задач управления рабочим временем персонала, современных методов и средств их решения.
2. Принцип распределения ГО ЭПС на РС с последующим распределением основных ММ по РС.
3. Принцип планирования рабочего времени подменных ММ, исходя из возможностей проведения обеденных перерывов (ОП) основных ММ.
4. Описание фитнес-функции, хромосомы, кроссинговера, мутаций, используемых при организации работы генетического алгоритма для решения задачи построения ГР ПрК.
5. Процедуры автоматического построения ГР и состава ПрК.
6. Результаты имитационных экспериментов, выполненных с целью анализа качества функционирования разработанного математического и ПО.

Достоверность результатов исследований опирается на результаты проверки адекватности использованных моделей и обусловлена корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, высоким качеством работы математических моделей на основе данных, полученных от подразделений ГУП «Московский метрополитен», и совпадением результатов работы моделей с аналогичными результатами, полученными высококвалифицированными сотрудниками соответствующих подразделений ГУП «Московский метрополитен» без использования средств автоматизации.

Апробация результатов исследования. Основные идеи, положения и результаты, раскрытые в диссертации, докладывались и получили положительную оценку на следующих международных и российских научных конференциях:

Студенческая научно-практическая конференция «Неделя науки-2017», г. Москва, 2017 г.;

Международная научно-практическая конференция «Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации», г. Санкт-Петербург, 2017 г.;

Студенческая научно-практическая конференция «Неделя науки-2018», г. Москва, 2018 г.;

Студенческая научно-практическая конференция «Неделя науки-2019», г. Москва, 2019 г.;

Международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем», г. Москва, 2019 г.;

IX Международная практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте», г. Гомель, 2019 г.;

Международная научная конференция IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), г. Батуми, 2019 г.;

Международная научная конференция IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), г. Батуми, 2021 г.;

II Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные транспортные системы», г. Москва, 2023 г.;

II Международной научно-практической конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ: загляни за горизонт», г. Москва, 2023 г.

Структура и объем диссертации. Работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы, содержащий 174 наименований, 13 приложений, 54 рисунка и 23 таблицы. Общий объем рукописи – 171 страница без приложений.

ОСНОВНОЕ 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 как составной части интегрированных систем управления метрополитенов. Показано важное место задачи распределения трудовых ресурсов в управлении современным предприятием, в частности на метрополитене, классифицированы системы управления распределением времени персонала. Показана роль системы сбалансированных показателей при создании автоматизированных информационно-управляющих систем (АИУС), к которым относится ИСУМ, определено влияние архитектуры АИУС на качество анализа достижения стратегических целей современного предприятия.

Блок ИСУМ, связанный с прогнозированием, планированием и анализом работы машинистов на ряду с другими задачами предполагает создание ГР ММ. Данная функция реализуется с помощью ИСП ГР ММ.

Блок ИСУМ, связанный с прогнозированием, планированием и анализом работы группы разработчиков, поддерживающих работу и развитие ИСУМ, на ряду с другими задачами предполагает создание ГР групп разработчиков, задействованных в поддержке проектировании, отладке, сопровождении, модификации и эксплуатации ГРТС. Данная функция реализуется с помощью ИСП ГР ММ.

Сформирована методика автоматизированного решения задач формирования ГР ММ (S_W) включающая в себя несколько подпроцессов: построение ГР основных ММ (S_{MW}), построение ГР подменных ММ (S_{HW}), построение ГР маневровых ММ (S_{LW}).

При этом учитывалось, что ГР существующих трех типов ММ связаны между собой, в них могут быть задействованы общие ресурсы (Рисунок 1). На основании этих положений сформирована модель процесса построения ПГД ППМ (пассажирских поездов метрополитена), ГО ЭПС и ГР ММ.

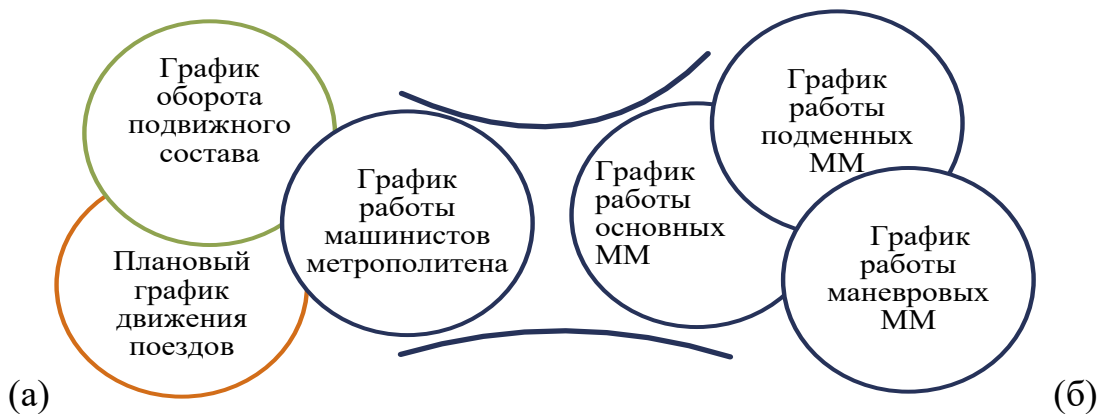


Рисунок 1 – Связь процессов построения ПГД ППМ, ГО ЭПС и ГР ММ (а) и его детализация (б)

Приведены примеры и анализ опыта внедрения АИУС на промышленных предприятиях, которые составляют основу разработанных в ходе диссертационного исследования математических методов решения задачи повышения эффективности использования рабочего времени персонала при проектировании, отладке, сопровождении, модификации и эксплуатации ИСУМ. В качестве таких систем могут выступать интеллектуальные системы управления технологическими процессами планирования движения поездов метрополитена и ИСП ГР ММ как элемент ИСУМ.

Вторая глава посвящена формализации задачи повышения эффективности использования и распределения времени работы ММ. В ходе диссертационного исследования сформулированы ключевые требования к организации труда ММ (Рисунок 2). Для соблюдения обязательных требований проанализированы нормативные документы (Трудовой кодекс РФ, Положение об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена) и сформулированы ограничения, накладываемые на ГР ММ (Таблицы 1 и 2).

Требования при составлении графика работы ЛБ	
Обязательные	Дополнительные
Соблюдение ПГД	Компактность нагрузки
Соблюдение нормативных документов, определяющих работу персонала	Минимизация общей численности персонала

Рисунок 2 – Требования к графику работы ММ

Критерий качества решения можно описать следующим образом:

$$Q_{\text{ММ}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ММ}}$ – количество задействованных ММ.

Для описания ограничений работы основных ММ вводятся следующие константы:

T_{train}^{\max} – продолжительность движения поездов по линии в течение суток, которая обычно составляет 21,5 часа (с 5:00 до 2:30 следующих суток);

P^0 – отчетный период;

$T_{\text{max}}^{\text{day}}$ – максимально возможный промежуток времени в рамках суток, ограниченный величиной T_{train}^{\max} ;

T_{fi}^{day} – промежутки работы, обеденного времени или отдыха, ограниченные одними сутками, где f – тип деятельности, i – порядковый номер промежутка из L промежутков;

T_{0i}^{day} – промежуток времени, ограниченный одними сутками, отведенный под отдых, где i – порядковый номер промежутка;

T_{1i}^{day} – промежуток времени, ограниченный одними сутками, отведенный под работу, где i – порядковый номер промежутка;

T_{2i}^{day} – промежуток времени, ограниченный одними сутками, отведенный под перерывы в работе, где i – порядковый номер промежутка;

a_j – ограничения в работе ММ (измеряется в часах), продиктованные нормативными актами, где j – номер ограничения.

$t_{fi, \text{st}}^{\text{day}}, t_{fi, \text{fin}}^{\text{day}}$ – время начала и окончания промежутка времени T_{fi}^{day} . Условные обозначения и величина ограничения a_j , используемые в формулах, приводятся в первом столбце таблицы.

Решение задачи формирования ГР основных ММ проводилось в два этапа:

- первичное деление ГО ЭПС на рабочие интервалы (РИ), из которых формируются РС с учетом перерывов в работе, времени приемки и сдачи ЭПС;
- распределение времени работы ММ по графику РИ.

Таблица 1 (а) – Условия работы. Источник – «Трудовой кодекс РФ»

п/п	Лингвистическое описание условия	Формализованное описание условия
1.1	Работа в течение двух смен подряд запрещается	(Подробнее описано в условии 2.1)
1.2	Рабочий день может быть разделен на части с тем, чтобы общая продолжительность рабочего времени не превышала установленной продолжительности ежедневной работы.	(Подробнее описано в условии 2.1)
1.3	Для работников, условия труда на рабочих местах которых по результатам специальной оценки условий труда отнесены к вредным условиям труда 3 или 4 степени или опасным условиям труда, допускается не более 36 рабочих часов (a_1) в неделю	$\sum_{k=1}^7 \sum_i T_{1i}^{day} \leq a_1$ $i = 1 \dots L$
1.4	В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов (a_2) и не менее 30 минут (a_3) Дополнительное условие – о невозможности проводить ОП в первые 30 минут работы (a_4)	$a_3 \leq T_{2i}^{day} \leq a_2$ $t_{21,st}^{day} - t_{11,st}^{day} \leq a_4$
1.5	Продолжительность еженедельного непрерывного отдыха не может быть менее 42 часов (a_5).	$\begin{cases} \max(t_{11,st}^{day'} - t_{1L,fin}^{day}) \geq a_5 \\ [t_{1i,st}^{day''}; t_{1L,fin}^{day''}] \notin [t_{1L,fin}^{day}; t_{11,st}^{day'}] \\ day = 1, \dots, 6 \\ day' = 2, \dots, 7 \\ day'' = 1, \dots, 7 \end{cases}$
1.6	В нерабочие праздничные дни допускается производство работ, приостановка которых невозможна по производственно-техническим условиям работ, вызываемых необходимостью обслуживания населения	(Учитывается при формировании смен)

Таблица 2 (а) – Условия работы. Источник – положение «Об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена»

п/п	Лингвистическое описание условия	Формализованное описание условия
2.1	Рабочих часов в день: $\leq 8,5$ (a_6) или ≤ 12 (a_7) в 2 смены (при этом $8 + <4$) (a_8, a_9)	$\sum_i T_{1i}^{day} \leq a_6$ $i = 1, 2$ или $\begin{cases} \sum_i T_{1i}^{day} \leq a_7, i = 1, \dots, 3 \\ T_{11}^{day} + T_{12}^{day} \leq a_8, \\ T_{13}^{day} \leq a_9 \end{cases}$
2.2	Нельзя устанавливать более 2-х смен подряд, охватывающих промежутки от 00:00 до 5:00 часов по местному времени ($[a_0; a_{10}]$)	Если $\begin{cases} t_{1i,fin}^{day} \in [a_0; a_{10}] \\ t_{1i,fin}^{day+1} \in [a_0; a_{10}] \end{cases}$, то $t_{1i,fin}^{day+2} \notin [a_0; a_{10}]$

Таблица 2 (б) – Условия работы. Источник – положение «Об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена»

п/п	Лингвистическое описание условия	Формализованное описание условия
2.3	Через 3-4,5 (a_{11} , a_{12}) после начала работы необходим перерыв на обед (0,5 – 2 часа) (a_{13} , a_{14})	Если $T_{1i}^{day} \geq a_{12}$, то $\begin{cases} t_{11,st}^{day} + a_{11} \leq t_{12,st}^{day} \leq t_{11,st}^{day} + a_{12} \\ a_{13} \leq T_{21}^{day} \leq a_{14} \end{cases}$
2.4	Отдых сегодня $\geq 2 \times$ Работа вчера (a_{15})	$a_{15} \sum_i T_{1i}^{day} \leq \sum_i T_{0i}^{day+1}$
2.5	Отдых сегодня ≥ 12 часов (a_{16})	$\sum_i T_{0i}^{day} \geq a_{16}$
2.6	Число выходных дней $a_{18} \geq$ число воскресных дней в отчетном периоде a_{17} .	$\begin{cases} a_{17} = \sum_{k=1}^{p^0} \{(24 - \sum_i T_{0i}^{day}) = 0\} \\ a_{18} \geq a_{17} \end{cases}$
2.7	Машинисты могут консолидировать отдых и брать разом (но только за 2 недели)	(Нет противоречия условиям 1.3, 1.5, 2.6)
2.8	Перерыв для отдыха от 25 минут (a_{19}) при работе свыше 7 часов (a_{20})	Если $T_{2i}^{day} \geq a_{19}$ то $\sum_i T_{1i}^{day} \geq a_{20}$
2.9	При работе ночью в 2 смены перерыв между ними должен быть $\geq 2,5$ часа (a_{21}).	Если $\begin{cases} t_{1i,fin}^{day} \in [a_0; a_{10}] \\ t_{11,st}^{day+1} \in [a_0; a_{10}] \end{cases}$ то $t_{11,st}^{day+1} - t_{1i,fin}^{day} \geq a_{21}$ Или если $\begin{cases} t_{1i,fin}^{day} \in [a_0; a_{10}] \\ t_{1i-1,fin}^{day+1} \in [a_0; a_{10}] \end{cases}$ то $t_{1i,st}^{day} - t_{1i-1,fin}^{day+1} \geq a_{21}$

Распределение ГО ЭПС по РИ проводилось со следующими особенностями:

– равномерное разделение ГО таким образом, чтобы продолжительность РИ не превышала фиксированное значение (один из параметров модели, не включающий время приемки / сдачи ЭПС);

– «укорачивание» первого за день РИ проводилось в случае, когда между его началом и окончанием последнего РИ накануне существует такой промежуток времени (в рассматриваемых примерах 3 часа), который допускает теоретическую возможность связи этих РИ и выход одного ММ на оба РИ.

Для решения задачи повышения эффективности использования рабочего времени и формирования ГР основных ММ разработан алгоритм построения S_{MW} (Рисунок 3), заключающийся в рекурсивном вызове процедуры добавления в S_{MW} РС, необходимой для реализации заданного элемента (e_V) ГО ЭПС (S_V), начиная с заданного момента времени τ при заданной последовательности работы РС, реализующих предыдущие и текущий элементы ГО до момента времени τ , т.е. при заданном текущем составе множества основных ММ (M_{MW}) и S_{MW} .

При первом вызове этой процедуры (блок 1) в качестве фактических значений ее параметров выступают:

- первый элемент S_V ;
- значение времени, равное началу первого элемента S_V ;
- пустое множество $M_{MW} = \emptyset$;
- пустое множество $S_{MW} = \emptyset$.

В ходе выполнения процедуры в цикле для всех элементов множества M_{MW} проверяется условие возможности добавления РС (цикл со 2 по 11 блоки), реализующей заданный e_V с момента времени τ , в соответствии с правилами организации режима труда и отдыха, приведенными в Таблицах 1 и 2 (блок 3).

Если условия, проверяемые в блоке 3, выполняются для текущего элемента множества M_{MW} , то происходит:

- добавление РС для текущего элемента в множество S_{MW} (блок 4);

если заданный e_V считается выполненным (блок 5), то в качестве заданного e_V начинает рассматриваться следующий элемент S_V (блок 8), а в качестве значения заданного момента времени τ рассматривается его начало. Если все элементы S_V просмотрены (блок 6), то производится анализ полученного решения (блок 9), алгоритм заканчивает свою работу (блок 11). Удаление ранее добавленного элемента (блок 10) производится для того, чтобы рассмотреть все возможные последовательности работы ММ в рамках M_{MW} .

- Если заданный e_V не считается выполненным, то в качестве значения заданного момента времени τ рассматривается время окончания ведения текущего ММ состава в рамках добавленной РС (блок 7);

- вызов процедуры добавления в S_{MW} РИ с новыми параметрами (блок 21).

Если условие возможности добавления РИ, реализующего заданный e_V с момента времени τ , для текущего элемента множества M_{MW} не выполняется, то происходит переход к следующему элементу множества M_{MW} .

Если ни для одного элемента множества M_{MW} не выполнено условие возможности добавления еще одного РИ, или множество M_{MW} пустое (блок 12), то происходит добавление во множество M_{MW} нового элемента (блок 13). Далее реализуется уже описанный выше алгоритм (блоки 13-19 аналогичны блокам 4-10). В блоке 20 алгоритм завершает свою работу. В блоке 21 производится выход из рекурсивного алгоритма.

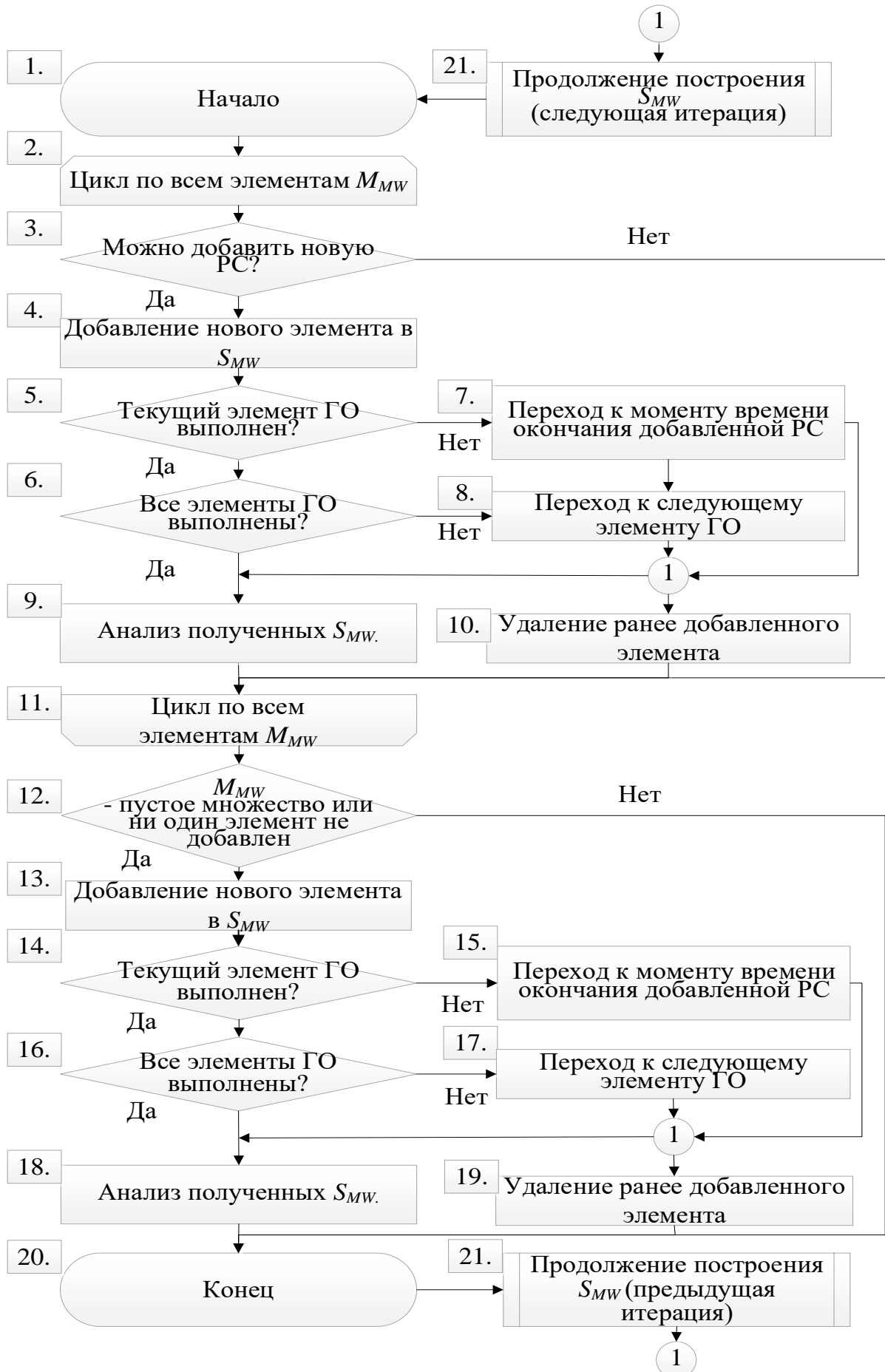


Рисунок 3 – Схема алгоритма распределения ММ по графику РИ

Критерий равномерности назначения основных ММ на сформированное расписание РИ $R_M(x_1, \dots, x_N)$ формализуется следующим образом:

$$R_M(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left[\sum_{k=1}^N (f_{Mk} | x_k = i) \right]^2, \quad (2)$$

где x_k – номер основного ММ, задействованного для реализации k -го РИ;

f_{Mk} – вес ребра, соответствующего назначению выбранного основного ММ на k -й РИ, равный длительности РИ;

N – продолжительность процесса, число РИ;

$i = 1, \dots, I_{MW}$ – возможные значения номера основного ММ из результирующего множества M_{MW} ;

I_{MW} – число задействованных основных ММ, мощность множества M_{MW} .

Оценкой сверху мощности множества решений можно считать $(I_{MW})^N$, где N – число РС.

Алгоритм автоматизированного построения ГР подменных ММ сформирован аналогично алгоритму для построения ГР основных ММ (Рисунке 3).

Для всех сформированных маршрутов и РС согласно правилам формирования ОП (не ранее чем через 3 часа работы и не позже чем через 4,5 часа работы ММ, условие 2.3 Таблицы 2) выбирается перечень возможностей для перерывов в работе. Производится сортировка всех элементов перечня в порядке возрастания моментов времени, когда они могут начаться. Для последующего построения дерева ОП выбираются те элементы перечня, которые можно считать начальными вершинами (после них в ряде отсортированных значений встречаются хотя бы по разу все РС, для которых запланированы ОП). Для каждой из вершин реализовано построение дерева возможностей для проведения ОП.

После прохождения всех элементов и завершения каждого пути дерева производится расчет критерия качества данного пути (Формула 3) и производится выбор наилучшего значения по всем путям деревьев.

$$\Delta D = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I-1} \Delta d_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где ΔD – сумма длительностей всех простоев между привлечением к работе подменных ММ в период ОП основных ММ;

i – номер одного из I промежутков;

j – номер одного из J ММ;

Δd_{ij} – промежутки между привлечением ММ (в рамках суток).

I_{HW} – число задействованных подменных ММ.

Оценкой сверху мощности множества решений можно считать $(I_{HW})^{N_D}$, где N_D – число РС, для которых должны быть реализованы ОП.

Третья глава посвящена формализации задачи повышения эффективности управления персоналом в рамках жизненного цикла элементов ИСУМ, в том числе ИСП ГР ММ, разработанной во второй главе.

Основной критерий выбора решения – минимизация затрат на трудовые ресурсы, времени на выполнение проекта и различных рисков (потери из-за текучести кадров, затраты на обучения, больничные).

В рамках задачи проект делится на перечень задач. Формируется граф, отражающий последовательность выполнения задач, где некоторые нельзя начать решать, не закончив решение предыдущих.

Для учета командной работы были введены понижающие коэффициенты в случае крупных ПрК, теряющих время на совещания, и повышающие коэффициенты для младших сотрудников, обучающихся у старших в ходе реализации. Задача построения ГР ПрК решалась с помощью генетического алгоритма. Фитнес-функция учитывала два критерия: продолжительность выполнения проекта и стоимость проекта, которая зависела от состава ПрК (Формула 4).

$$Cost = k_C \sum_{j=1}^J \frac{\frac{1}{K_j(p_{1j}, p_{2j}, p_{3j}, \dots, p_{Ij})} \sum_{i=1}^I m_i p_{ji} Pr_{ji}}{\sum_{i=1}^I p_{ji} / Pr_{ji}} + k_{\Delta T} \Delta T, \quad (4)$$

где k_C – коэффициент значимости, связанный со слагаемым, определяющим сумму всех затрат на персонал;

$K_j(p_{1j}, p_{2j}, p_{3j}, \dots, p_{Ij})$ – суперпозиция индивидуальных эффективностей, зависящая от состава участников команды, работающих над каждой из J задач, учитывающая изменение индивидуальной эффективности K_{ij} сотрудника при работе в ПрК;

$p_{1j}, p_{2j}, p_{3j}, \dots, p_{Ij}$ – количество участников команды каждого из I типов при работе над j -й задачей;

m_i – дневная ставка ресурса i -го типа;

Pr_{ij} – производительность ресурса i -го типа при работе над j -й задачей.

ΔT – сумма разниц минимально и максимально возможного начала выполнения каждой из задач;

$k_{\Delta T}$ – коэффициент значимости параметра ΔT .

Разработанная схема решения апробирована на примерах внедрения АИУС, описанных в первой главе. Трудоемкость проекта для расчетной модели ниже почти на 30 % по сравнению с реальным проектом.

После корректировки входных данных: состава ПрК, соотношения стоимости их труда, перечня, последовательности и времени реализации задач разными ресурсами, матрицы изменения индивидуальной эффективности при работе в ПрК – модель была адаптирована для построения ГР ПрК, задействованных в реализации ИСП ГР ММ, МО которой разработано во второй главе диссертационной работы. На Рисунке 4 приведено решение задачи построения ГР ПрК, задействованных в реализации ИСП ГР ММ в разбивке по задачам.

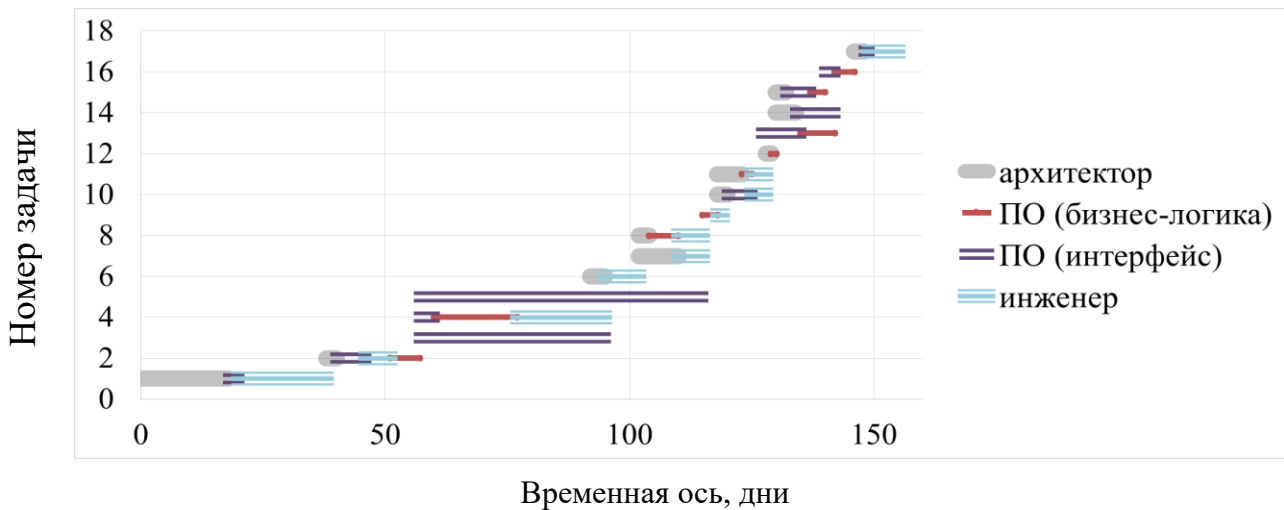


Рисунок 4 – Распределение ресурсов по проекту в формате диаграммы Ганта

Согласно распределению на Рисунке 4 на протяжении проекта сотрудники привлекаются на разную долю занятости. Это позволяет планировать их работу на других проектах или назначать им обучение на этапах проекта с низкой вовлеченностью. Полученные результаты могут стать основой для формирования внутренней команды специалистов или формирования бюджета под проект для привлечения внешних сотрудников в процессе планирования и внедрения различных элементов ИСУМ на метрополитене.

В четвертой главе для решения задачи повышения эффективности использования рабочего времени сотрудников метрополитена в рамках диссертационного исследования разработано ПО с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений *MATLAB*. С использованием ПО получены результаты и графики для ГР ММ и ГР ПрК.

При решении задачи формирования ГР ММ использовалось несколько параметров разбиения ГО на РИ, в рассматриваемых примерах выбрано то значение продолжительности РИ для каждой из рассматриваемых линий, которое соответствовало минимальному числу привлекаемых основных ММ (Рисунок 5). В рамках диссертационной работы разработаны модели, описывающие процессы сдачи и приемки ЭПС в зависимости от нахождения ЭПС (электродепо, промежуточная станция, тупик после ночной смены, электродепо после ночной смены). Время на приемку и сдачу ЭПС учитывалось при построении ГР ММ.

В рамках работы задача формирования ГР ММ решена для Таганско-Краснопресненской линии (ТКЛ), Замоскворецкой линии (ЗЛ), а также проведена адаптация ИСП ГР ММ для машинистов Московского Центрального Кольца.

Расхождения в особенностях работы машинистов МЦК и ММ приведены в Таблице 3. В ходе апробации выявленные особенности учитывались путем изменения соответствующих настроек ИСП ГР ММ.

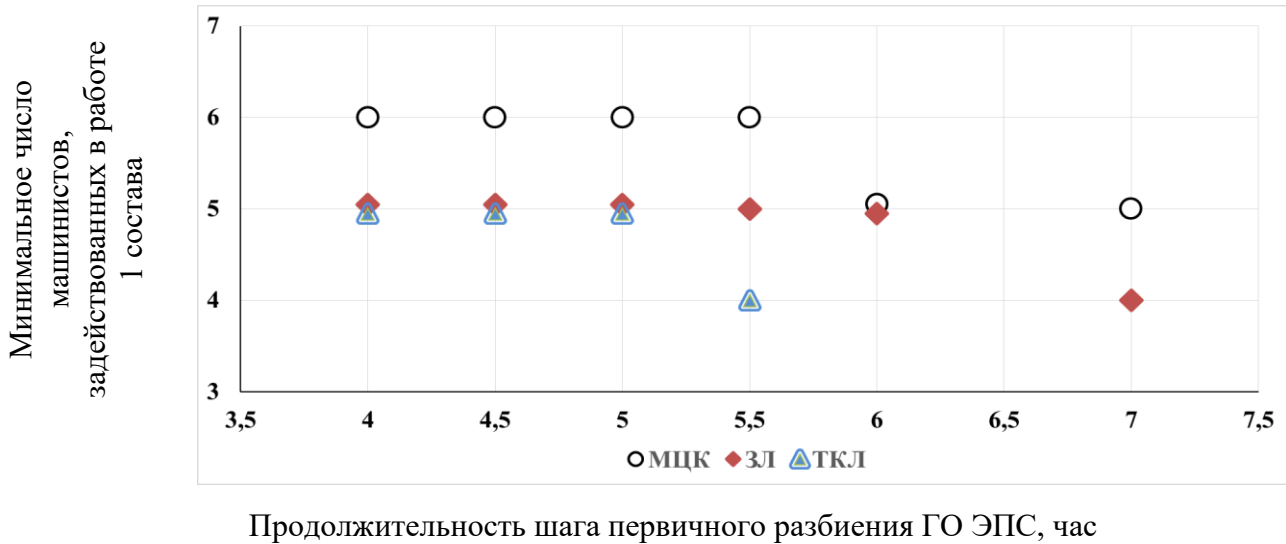


Рисунок 5 – Зависимость числа задействованных машинистов от продолжительности РИ для первых 1000 рассмотренных решений

Таблица 3 – Особенности работы и различия для ММ и машинистов МЦК

п/п	Лингвистическое описание условия для ММ	Лингвистическое описание расхождения условия для машинистов МЦК
1	Допускается не более 36 рабочих часов (a_1) в неделю	Производится учет за месяц (136 часов) или около 32 часов в неделю
2	Рабочих часов в день: $\leq 8,5$ (a_6) или ≤ 12 (a_7) в 2 смены (при этом $8 + <4$) (a_8, a_9)	Продолжительность смены 12 часов, но после 6-10,5 часов работы в качестве основного машиниста МЦК переходит к задачам подменного и маневрового машиниста.
3	Нельзя устанавливать более 2-х смен подряд, охватывающих промежуток [$a_0 = 0$ ч.; $a_{10} = 5$ ч.]	[$a_0 = 22$ ч.; $a_{10} = 7$ ч.]
4	Отдых сегодня $\geq 2 \times$ Работа вчера ($a_{15})=2$	После ночного отдыха в пункте оборота не более 10 часов, из них не более 3 кругов по МЦК.
5	При работе ночью в 2 смены перерыв между ними должен быть $\geq 2,5$ часа (a_{21}). При учете ночные смены относятся к тем суткам, когда они были начаты.	Отдых в пункте оборота не менее $\frac{1}{2}$ отработанного времени, но не менее 3 часов.

Для совершенствования алгоритма распределения основных ММ по графику РИ (Рисунок 3, блоки 2-11) был реализован направленный перебор по принципу: при переходе к следующему РИ первой рассматривается возможность назначения для того ММ, который за последнюю неделю сформированного ГР привлекался к работе меньше остальных. На Рисунке 6 видно, что с использованием направленного перебора при

рассмотрении фиксированного числа решений алгоритм быстрее выходит на решения с лучшими значениями СКО продолжительностей РС ММ за весь период учета (37 дней для депо «Выхино» ТКЛ). Анализ полученных результатов с использованием направленного перебора приводится в Таблице 4 и на Рисунке 7.

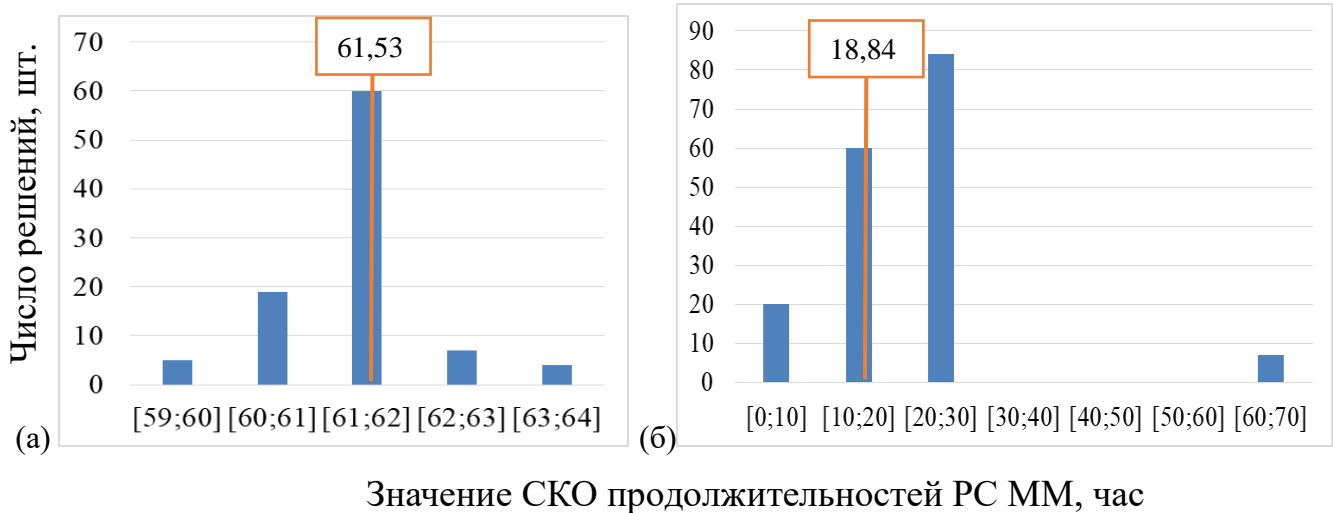


Рисунок 6 – Столбчатая диаграмма распределения значений критерия (3) по множеству решений Депо «Выхино» ТКЛ: а) без использования направленного выбора элементов множества основных ММ; б) с использованием направленного выбора.

Указано среднее значение критерия для рассмотренных решений

Таблица 4 – Анализ рассмотренных решений задачи автоматизации ГР основных ММ и машинистов МЦК

Линия	Число задействованных машинистов, чел.	Число рассмотренных решений, шт.	Число заверенных решений, шт.	Период учета, дни	Худшее из рассмотренных значений СКО продолжительностей РС машинистов за весь период учета, час	Лучшее из рассмотренных значений СКО продолжительностей РС машинистов за весь период учета, час
ЗЛ	4-5	3199	162	39	63,46	1,12
	≥ 6		35		Решения отсеяны из-за большого числа задействованных ММ	
ТКЛ	4-5	5201	170	37	60,64	1,34
	≥ 6		151		Решения отсеяны из-за большого числа задействованных ММ	
МЦК	5	2373	165	44	7,31	0,64
	≥ 6		205		Решения отсеяны из-за большого числа задействованных ММ	

Согласно результатам, представленным на Рисунке 7, видно, что с помощью использования ИСП ГР ММ можно добиться более равномерного (справедливого) распределения РС в качестве основных машинистов (по числу РС за каждые 7 дней и по продолжительности работы за каждые 7 дней).

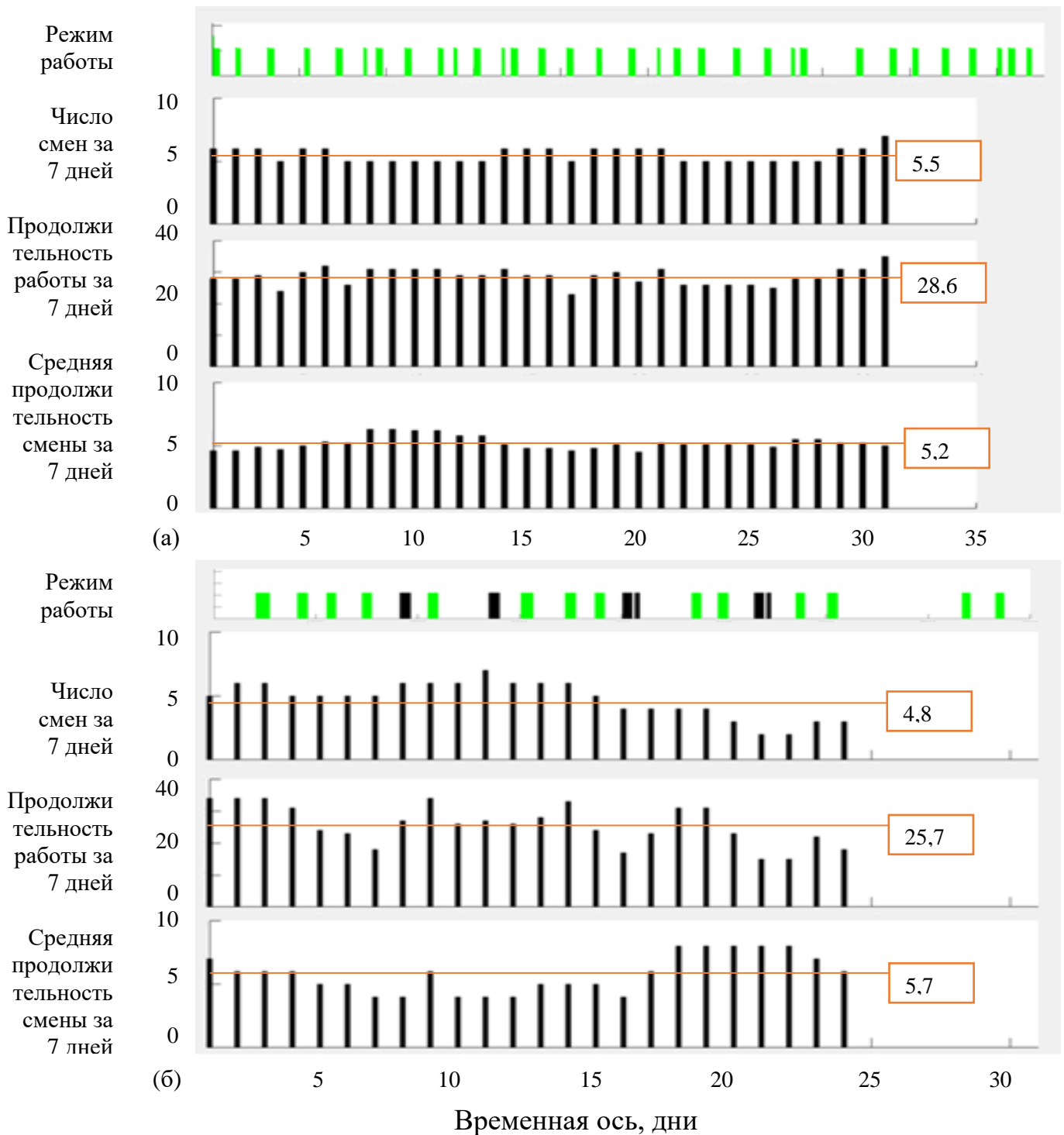


Рисунок 7 – Примеры ГР ММ (ТКЛ) и основные показатели для одного машиниста согласно: а) результатам ИСП ГР ММ; б) реальным нарядам работ. Уровень определяет среднее значение показателя, для определения показателя учитываются 7 дней, следующих за текущим

Решение для полного ГО ЭПС формируется за счет масштабирования ГР для первого маршрута. Каждый следующий маршрут повторяет предыдущий с учетом сдвига на один день, исключая субботу и воскресенье. Для выходных дней ГР ММ составляется аналогично, как для рабочих, только по ГО выходных дней.

При формировании ГР подменных ММ для линии выбирается станция метрополитена, оборудованная под проведение ОП для основных ММ. В качестве возможностей для проведения ОП для ТКЛ выбираются интервалы времени между моментами прибытия маршрутов на станцию «Кузьминки» по I и II главным путям. Часть промежутков не подходит для проведения ОП по следующим причинам:

- промежуток не удовлетворяет условиям работы основных ММ (Таблица 1, условие 1.4 и Таблица 2, условие 2.3);
- начало промежутка попадает на конец РС и отработать осталось менее заданного времени (20 минут), в этом случае проведение ОП считается нецелесообразным;
- продолжительность РИ позволяет не проводить ОП;
- ОП для данного основного ММ уже предоставлялся в текущих сутках.

На Рисунке 8 приведено решение задачи формирования ГР подменных ММ по ОП депо «Выхино» ТКЛ с минимальным значением критерия качества.

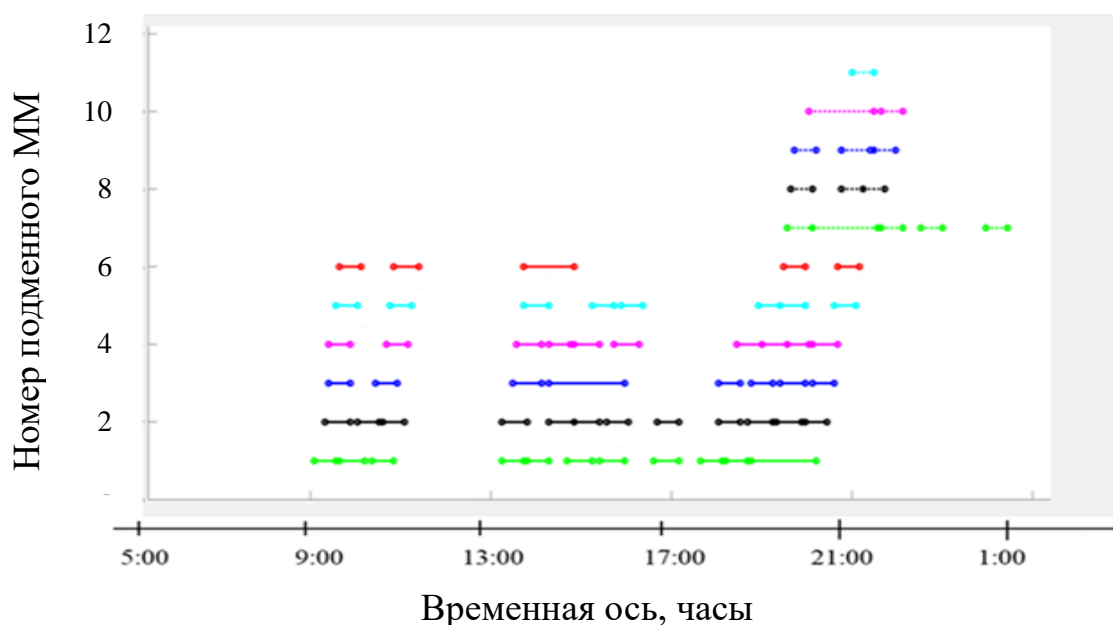


Рисунок 8 – Полученные с использованием ИСП ГР ММ результаты решения задачи распределения времени работы подменных ММ с минимальным критерием качества (4) для депо «Выхино» ТКЛ

В Таблице 5 приведена статистика решений. Одинаковое число подменных ММ может быть связано со схожестью структуры и протяженности рассматриваемых линий метрополитена. Станция для подмены выбирается исходя из ГО ЭПС и времени хода до станции. Используя предложенную модель, можно сравнивать временные затраты на проведение ОП для различных станций линии. При значениях простоя, превышающих несколько часов, подменных ММ можно привлекать в другим работам: осуществлению маневров, прохождению обязательных медкомиссий и т.п.

При сравнении результатов, полученных с помощью модели и реального графика нарядов сотрудников, видно, что в реализованной модели число задействованных ММ составляет до 28% от реальных значений для разных депо (Таблица 6).

Таблица 5 – Анализ рассмотренных решений задачи формирования ГР подменных ММ и машинистов МЦК

Станция для проведения ОП	Число задействованных маршрутов, шт.	Число задействованных подменных машинистов, чел.	Число РИ для подмен, шт.	Число завершённых решений, шт.	Наибольшее значение среднего времени простоя одного машиниста за сутки, час	Лучшие значения показателей эффективности, час		
						Среднее время простоя одного машиниста за сутки, час	Среднее время работы одного машиниста за сутки, час	Средняя продолжительность РС одного машиниста за сутки, час
Автозаводская (ЗЛ)	39	11	43	70	3,8	2,1	4,2	6,3
Кузьминки (ТКЛ)	37	11	68	55	4,7	3,8	3,7	7,5
Андроновка (МЦК)	44	25	98	55	3,9	2,7	5,7	8,4

Таблица 6 – Сравнение результатов, полученных с помощью модели и реального графика нарядов сотрудников

Линия		Число основных машинистов в депо	Число подменных машинистов в депо	Суммарное число основных и подменных машинистов в депо	Процент переработок каждого из машинистов	Относительное сокращение числа задействованных машинистов
ЗМ	Модель	156	15	171	0	28%
	Пример	240			1,6 %	
ТКЛ	Модель	148	16	164	0	18%
	Пример	200			2,7 %	
МЦК	Модель	220	47	267	0	0%
	Пример	264			3,2 %	

Примечательно, что в приведенных примерах частота пересечения станции, выбранной для проведения ОП, позволяет обеспечить основных ММ перерывами в работе без дополнительных затрат на дорогу к месту нахождения вверенного ему ЭПС. В случае, если время полного оборота линии не позволяет использовать одну станцию для смены основного и подменного ММ, к времени работы основного ММ может добавиться время его движения навстречу ЭПС после ОП. При этом возможно использование текущего алгоритма формирования расписания ГР подменных ММ, где в качестве времени окончания элементов перечня потенциальных ОП используется

время пересечения с выбранной промежуточной станцией для смены машинистов. Продолжительность промежутка подмены при этом увеличивается с 0,5-2 часов ОП до времени ОП с учетом дороги от станции проведения ОП до места встречи основного с подменным ММ.

Методика повышения эффективности использования рабочего времени маневровых ММ похожа на подменные, поскольку процесс их работы строго регламентирован ПГД, а именно длительностью оборотов в различные промежутки времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение автоматизированного построения графика работы машинистов метрополитена позволяет повысить скорость и точность распределения времени работы сотрудников метрополитена и МЦК по сравнению с используемыми процедурами, преобладающе неавтоматизированными. Реализация на базе разработанных алгоритмов программного обеспечения интеллектуальной системы понизит влияние человеческого фактора на процесс планирования работы сотрудников метрополитена и снизит число ошибок в рамках интеграции с другими элементами ИСУМ.

Итоги, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключается в следующем:

1. Выполнен анализ работ, посвященных проблемам планирования перевозочного процесса метрополитена и управления рабочим временем в различных отраслях экономики, позволил создать методику автоматизированного построения ГР ММ и выбрать методы решения соответствующих задач, к которым относятся графовые модели и рекурсивные алгоритмы. Применение этой методики позволило расширить множество задач, включенных в жизненный цикл автоматизированного планирования движения поездов метрополитена и повысить эффективность их решения за счет интеграции систем, итерационности поиска решения, расширения множества поиска решений и повышения скорости поиска решения.

2. Созданы процедуры, позволяющие более точно, чем в исследованных работах, решать задачу построения распределения ресурсов при управлении электропоездом метрополитена.

3. Разработана система МО, ИО и ПО средств автоматизации построения ГР ММ, которая имеет развитые возможности для выполнения адаптации. В рамках единого интерфейса реализовано решение задач повышения эффективности использования рабочего времени персонала с различным типом занятости:

- задача построения ГР ММ;
- задача построения ГР ПрК, задействованных в реализации средств автоматизации на метрополитене.

4. Доказана целесообразность использования ПО для построения ГР основных и подменных ММ. Для этого произведено сравнение фактического ГР ММ и графика, полученного в ходе использования разработанного ПО. Согласно оценке разработанное

ПО может повысить эффективность использования трудовых ресурсов при формировании ГР ММ до 28% за счет автоматизации процесса перебора решений с заданными начальными требованиями и параметрами модели. Произведена апробация ПО для МЦК.

5. Доказана целесообразность использования ПО для построения и повышения эффективности использования рабочего времени и загрузки персонала, занятого в реализации стадий жизненного цикла элементов ИСУМ, в том числе и ИСП ГР ММ. Для этого произведено сравнение фактического ГР ПрК и графика, полученного в ходе использования разработанного ПО. Согласно оценке разработанное ПО может повысить эффективность использования трудовых ресурсов на проекте на 30% за счет детализации задач на протяжении проекта и их вовлечении на этапах низкой занятости в другие рабочие активности.

6. Разработана ИСП ГР ММ, которая может быть включена в комплексную ИСУМ для обеспечения управления движением на метрополитене. В будущих исследованиях методика автоматизированного построения ГР ПрК, задействованных в реализации элементов ИСУМ, может быть адаптирована для построения ГР и повышения эффективности использования рабочего времени других типов сотрудников транспортных предприятий, занятых в командной работе, предусматривающей решение большого числа взаимосвязанных задач на разных объектах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Маркевич, А.В. Анализ опыта внедрения автоматизированных информационно-управляющих систем на промышленном предприятии / А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: «Естественные и технические науки». – 2018. – Т. 6. – С. 88-97.

2. Маркевич, А.В. Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма / А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. – 2019. – №3. – С.36-49.

3. Маркевич, А.В. Интеллектуальная система построения графика работы машинистов метрополитена / А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Надежность. – 2023. – №3. – С. 63-72.

4. Маркевич, А.В. Интеллектуальная система построения графиков работы машинистов метрополитена / А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – №8. – С. 19-20.

б) в международной реферативной базе Scopus:

5. Markevich, A.V. Automating of Human Resources Management using Genetic Algorithms / A.V. Markevich, V.G. Sidorenko // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Batumi, Georgia:IEEE. – 2019. P.p. 436-444.

6. Markevich, A.V. Automation of Scheduling for Drivers of the Subway Rolling Stock / A.V. Markevich, V.G. Sidorenko // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS) – Batumi, Georgia:IEEE. - 2021. P.p. 129-138.

в) в материалах конференций:

7. Власюк (Маркевич), А.В. Применение ключевых показателей качества при управлении проектной работой / А.В. Власюк // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2017». – М.:МГУПС (МИИТ). – 2017. – С. 185-186.

8. Маркевич, А.В. Современное состояние информатизации бизнес-процессов / А.В. Маркевич // Материалы международной научно-практической конференции «Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации». – Спб: СПбГЭУ. – 2017. – С. 214-217.

9. Маркевич, А.В. Примеры внедрения автоматизированных информационно-управляющих систем / А.В. Маркевич // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2018». – М.:МГУПС (МИИТ). – 2018. – С. III 64.

10. Маркевич, А.В. Составление расписания работы сотрудников с использованием генетического алгоритма / А.В. Маркевич // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2019». – М.:РУТ (МИИТ). – 2019. – С. 283.

11. Кулагин, М.А. Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов / М.А. Кулагин, А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Труды XXVII международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: ИПУ РАН – 2019. – С. 265-270.

12. Маркевич, А.В. Влияние графика работы локомотивных бригад метрополитена на безопасность движения / А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» в 2-х ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 59-61.

13. Маркевич, А.В. Результаты апробации интеллектуальной системы планирования графика работы машинистов метрополитена / А.В. Маркевич, В.Г. Сидоренко // Материалы II Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы», г. Москва: РУТ (МИИТ), 2023. – С. 275-281.

Маркевич Агата Владимировна

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ РАБОТЫ
МАШИНИСТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы

Подписано в печать ____ . ____ . 2023 Заказ № _____ Формат 60x90/16

Тираж 80 экз.

Усл. печ.л. 1,5

Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

Типография Юридического института РУТ (МИИТ)