

На правах рукописи



Сафронов Антон Игоревич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА
КОЛЬЦЕВОЙ ЛИНИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КРИТЕРИЕВ РАВНОМЕРНОСТИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ) на кафедре «Управление и информатика в технических системах».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор

Сидоренко Валентина Геннадьевна

Официальные оппоненты: Уманский Владимир Ильич – доктор технических наук,

ЗАО «ИнтехГеоТранс», генеральный директор;

Астрахан Владимир Ильич – кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, Открытое акционерное

общество «Научно-исследовательский и проектно-

конструкторский институт информатизации,

автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»

(ОАО «НИИАС»), руководитель Центра обучения.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования

«Петербургский государственный университет путей

сообщения (ПГУПС)».

Защита диссертации состоится 20 ноября 2013 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» по адресу: 127994, ГСП–4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУПС (МИИТ).

Автореферат разослан 18 октября 2013 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 218.005.04,

д.т.н., профессор



В.Г. Сидоренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В крупных городах со времён появления первых видов городского общественного транспорта возникла проблема правильной организации его работы. Организация безопасного и ритмичного движения общественного транспорта обеспечивается наличием планового графика движения (ПГД).

Одним из основных видов городского общественного пассажирского транспорта столицы является Московский метрополитен. В период 2012–2020 гг. протяженность его линий должна увеличиться на 50%, количество станций – на 37%, количество депо – на 40%. Это повлечет за собой постоянное обновление ПГД, усложнение условий их построения. Новые требования, предъявляемые к качеству планирования перевозочного процесса, обуславливают задачу использования новых более совершенных, быстродействующих и эффективных сценариев автоматизации. Это определяет актуальность данной работы.

Представленная диссертационная работа является продолжением цикла работ, выполненных кафедрой «Управление и информатика в технических системах» МГУПС (МИИТ) по автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене.

В нашей стране и за рубежом накоплен значительный опыт автоматизации планирования и управления движением поездов метрополитена. Большой вклад в этой области внесли ученые нашей страны: Балакина Е.П., Баранов Л.А., Василенко М.Н., Дегтярев Д.П., Ерофеев Е.В., Жербина А.И., Козлов В.П., Логинова Л.Н., Сидоренко В.Г., Тишкин Е.М., Феофилов А.Н. и другие.

Целью диссертации является разработка методики автоматизированного построения ПГД для Кольцевой линии метрополитена с использованием критериев равномерности при учёте реальных условий эксплуатации Московского метрополитена.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведены анализ современного состояния вопроса и классификация задач планирования перевозочного процесса на метрополитене.

2. Определены критерии оценки качества ПГД с точки зрения равномерности.

3. Разработаны структура и принципы реализации рекурсивной процедуры автоматизированного построения ПГД.

4. Созданы сценарии построения процессов ПГД для Кольцевой линии.

5. Разработано программное обеспечение, реализующее рекурсивную процедуру и сценарии автоматизированного построения, и проанализированы результаты его функционирования.

Методы исследований. Результаты диссертационной работы получены на основе использования системного анализа, теории управления, теории расписаний, теории вероятностей, теории чисел, методов имитационного моделирования.

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 автоматизированного построения ПГД пассажирских поездов метрополитена с данными, полученными в результате работы опытных инженеров–графистов Московского метрополитена.

Научная новизна работы состоит в том, что:

– обоснованы структура и принципы организации рекурсивной процедуры построения ПГД, её эффективность;

– введены понятия условий реализуемости, реализации, успешной реализации и целостности ПГД, позволяющие автоматически контролировать ход построения ПГД;

– выявлены условия реализуемости и реализации процессов ПГД для линий всех типов с учетом особенностей отдельных процессов;

– формализована математическая модель процесса равномерного ввода/снятия составов в течение продолжительного промежутка времени с учётом географии линии;

– разработаны и реализованы сценарии построения всех процессов ПГД для Кольцевой линии;

– выполнено решение задачи постановки маршрута по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки, являющееся основой для сценария построения процесса ухода составов на ночную расстановку;

– модифицирован алгоритм выравнивания интервалов движения с учетом особенностей Кольцевой линии, а также одновременного ввода и снятия составов.

Практическая значимость:

– внедрение разработанных принципов организации и структуры рекурсивной процедуры автоматизированного построения ПГД позволило значительно расширить область поиска решения задачи построения ПГД;

– интеграция и унификация критериев качества, условий реализуемости и реализации, а также сценариев построения процессов ПГД позволили создать рекурсивную процедуру построения ПГД для различных типов линий;

– сценарии построения всех процессов ПГД для Кольцевой линии позволяют решать задачи построения ПГД для широкого диапазона изменения исходных данных и выполнять поиск эффективного варианта построения с точки зрения критериев равномерности;

– программное обеспечение для автоматизированного построения ПГД для Кольцевой линии с многофункциональным человеко–машинным интерфейсом позволяет существенно облегчить труд инженеров–графистов и сократить временные затраты на построение ПГД.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на заседаниях кафедры «Управление и информатика в технических системах» МГУПС (МИИТ) 2009–2013 гг., на научно–практических конференциях «Неделя Науки» (МИИТ, 2008–2013 гг.), на научно–практических конференциях «Безопасность Движения Поездов» (МИИТ, 2009–2012 гг.), на международных конференциях «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ИПУ РАН 2009–2011 гг.), на международной конференции «Проблемы регионального и муниципального управления» (РГГУ, 2010 г.), на международной конференции «Trans–Mech–Art–Chem»

(МИИТ, 2010 г.), на выставке научно–технического творчества молодёжи (ВВЦ, 2009 г., 2011 г.), на первой научно–технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (МИИТ, 2012 г.).

Реализация результатов работы. Разработанные сценарии автоматизированного построения процессов ПГД для Кольцевой линии являются составной частью автоматизированной системы построения планового графика движения пассажирских поездов на линии метрополитена (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 информатика в технических системах». Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 24 работы, 3 из них – в изданиях из перечня, определённого ВАК России для опубликования основных результатов диссертаций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 6 приложений, списка литературы, включающего 106 наименований, изложена на 176 страницах и поясняется 58 рисунками и 6 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведена классификация линий, процессов работы линии, соответствующих процессам ПГД, и моделей линий Московского метрополитена. Выявлены особенности Кольцевой линии согласно классификации линий Московского метрополитена:

- ограниченный ресурс выравнивания интервалов движения, связанный с отсутствием оборотов по станционным путям на линии;
- независимость главных путей линии;
- одно депо, обслуживающее оба независимо работающих пути линии;
- время полного оборота, меньше такта задания размеров движения;

– повышенный пассажиропоток как следствие того, что линия является пересадочным контуром.

В общем виде задача автоматизированного построения ПГД формулируется следующим образом: разработать сценарии, согласно которым в результате конечного числа ответов пользователя на общие вопросы (с вариантами ответов «Да/Нет») с промежуточным вводом исходных данных будет построен ПГД при учёте специфических параметров и ограничений. Построенный ПГД должен отвечать поставленным целям управления, быть рациональным с точки зрения выбранных критериев и устойчивым к возмущающим факторам.

К целям управления относятся:

- реализация заданной (изменяющейся во времени) парности движения в течение всего времени движения пассажирских поездов;
- правильность ночной расстановки (все маршруты должны завершить свое движение в той точке ночной расстановки, из которой на следующий день начинается движение следующего маршрута);
- реализация графика оборота (ГО), который регулирует проведение осмотров и ремонтов подвижного состава.

Выполнен анализ методов и средств автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене. Определены логические связи между публикациями, посвящёнными автоматизации построения ПГД. Приведены показатели качества ПГД.

Проведённый анализ позволил поставить задачу исследования, сделать выводы, показывающие актуальность разработки сценарного пространства построения процессов ПГД.

Во второй главе выполнены разработка и описание методики автоматизированного построения ПГД с использованием критериев равномерности на основе рекурсивного выполнения сценариев.

Любой ПГД представляет собой последовательность стационарных процессов, соединённых переходными процессами. Схема, представленная на Рисунке 1, иллюстрирует разработанную процедуру автоматизированного построения ПГД.

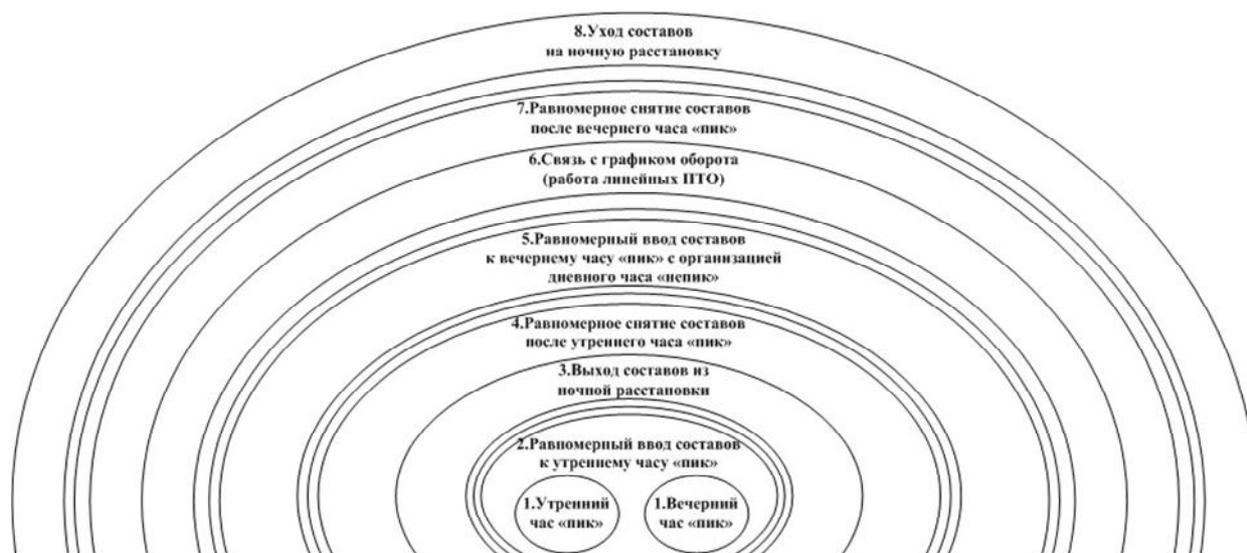


Рисунок 1 – Схема процедуры автоматизированного построения ППД

Введены следующие понятия и определено их место в рекурсивной процедуре автоматизированного построения ППД:

– условие реализуемости – априорная информация, позволяющая заранее определить, удастся ли с заданными начальными условиями успешно провести построение рассматриваемого процесса ППД;

– условие реализации – апостериорная информация, получаемая по итогам построения процесса ППД и позволяющая определить, удалось ли построить процесс в соответствии с заданными начальными условиями;

– условие успешной реализации построения ППД – апостериорная информация, получаемая по итогам построения всего ППД и позволяющая определить, удалось ли его построить в соответствии с заданными начальными условиями;

– целостность ППД – соответствие текущих параметров ППД всем условиям реализации, определённым для всех ранее построенных процессов ППД.

Проверка целостности графика основывается на анализе значений переменных состояния ППД. Особенности переменных состояния рассмотрены на примере организации связи ППД с ГО. Например, в пространстве переменных состояния текущий ремонт r может рассматриваться как:

– запланированный: $r \in R \wedge r \notin R_{real}$;

- выполненный: $r \notin R \wedge r \notin R_{real}$;
- выполняющийся: $r \notin R \wedge r \in R_{real}$,

где R – множество плановых ремонтов, согласно ГО;

R_{real} – множество выполняющихся в текущий момент времени ремонтов.

В качестве критериев для выбора рационального варианта реализации сценария построения процесса ПГД в диссертации использованы критерии равномерности. Выделяется два основных критерия, учитывающих понятие равномерного расположения: критерий равномерности интервалов по отправлению поездов со станций R_i ; критерий равномерности расположения вводимых/снимаемых составов R_N . Критерий R_N определяется следующим образом для Кольцевой линии:

$$R_N = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{вс}}(ch)-1} FCN(\mathbf{n}_k, \mathbf{n}_{k+1})^2 + \begin{cases} FCN(\mathbf{n}_{N_{\text{вс}}(ch)}, \mathbf{n}_1 : \mathbf{n}_{pn})^2, & \text{для случая ввода составов} \\ FCN(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_{N_{\text{вс}}(ch)} : \mathbf{n}_{pn})^2, & \text{для случая снятия составов} \end{cases}}{N_{\text{вс}}(ch) - 1}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\mathbf{n}_k \in M_{\text{вс}}(ch), \text{ если } \begin{cases} \mathbf{n}_k : \mathbf{n}_{pn} \in \emptyset, & \text{для случая ввода составов} \\ \mathbf{n}_k : \mathbf{n}_{nn} \in \emptyset, & \text{для случая снятия составов} \end{cases},$$

где \mathbf{n}_1 – первая в рассматриваемой последовательности нитка; нитка описывает движение маршрута от момента выхода на главный путь до момента ухода с этого пути, при учёте маневровых передвижений в начале и конце движения по главному пути. Нитка содержит информацию о переходах маршрута с одной нитки на другую, в порядке следования их по одному главному пути;

\mathbf{n}_k – k -я нитка, $k = 1, 2, \dots, M_{\text{вс}}(ch)$;

$\mathbf{n}_{N_{\text{вс}}(ch)}$ – последняя в рассматриваемой последовательности нитка; это нитка, по которой будет двигаться маршрут нитки \mathbf{n}_1 после совершения полного оборота; для Кольцевой линии это нитка $\mathbf{n}_1 : \mathbf{n}_{nn}$, где $\mathbf{n}_1 : \mathbf{n}_{nn}$ – компонент последовательности нитка – следующая нитка к нитке \mathbf{n}_1 , то есть нитка, по которой маршрут будет двигаться после окончания движения по нитке \mathbf{n}_1 ;

$M_{\text{вв}(ch)}$ – множество ниток, по которым вводятся/снимаются составы; нитки выбираются из последовательности ниток, начинающейся ниткой \mathbf{n}_1 и заканчивающейся ниткой $\mathbf{n}_{N_{\text{вв}(ch)}}$, по признаку отсутствия предыдущей нитки при вводе составов или следующей нитки при снятии составов;

$N_{\text{вв}(ch)}$ – количество ниток множества $M_{\text{вв}(ch)}$;

$FCN(\mathbf{n}_u, \mathbf{n}_w)$ – операция, в результате выполнения которой определяется количество ниток между двумя заданными $\mathbf{n}_u, \mathbf{n}_w$;

$\mathbf{n}_k : \mathbf{n}_{pn}$ – компонент последовательности нитка – предыдущая нитка к нитке \mathbf{n}_k , то есть нитка, по которой маршрут двигался до начала движения по нитке \mathbf{n}_k (до оборота).

Одной из важнейших особенностей ПГД, которая позволяет существенно упростить реализацию сценариев построения процессов ПГД, является свойство зеркальной симметрии ПГД, построенного на целый день. При переходе от общего вида ПГД к отдельным процессам ПГД можно выделить три уровня зеркальной симметрии:

– относительно центра отрезка времени, на котором осуществляется движение с минимальной парностью;

– относительно центра отрезка времени, на котором осуществляется движение с максимальной парностью, для каждой из ранее выделенных частей;

– зеркальную симметрию расстановки составов в заданных точках ночной расстановки вечером и выходом составов из точек ночной расстановки утром.

Согласно выбранным критериям, признаком качества построения ПГД является равномерность, которая имеет несколько уровней:

– равномерность интервалов движения по отправлению поездов со станций;

– равномерность ввода/снятия составов за время полного оборота составов на линии по каждому из путей;

– равномерность ввода/снятия составов за время полного оборота составов на линии в целом;

– равномерность ввода/снятия составов за время, равное нескольким полным оборотам составов на линии в целом.

В общем случае, процесс равномерного ввода/снятия составов в течение продолжительного промежутка времени с учетом географии линии может быть описан следующим образом (Рисунок 2):

1. Дано исходное множество M составов линии (отмечены белыми элементами на окружности), перемещающихся с интервалом движения J_1 .

2. Из множества M выбирается подмножество составов M_Σ , которое соответствует равномерному расположению вводимых/снимаемых составов за весь переходный процесс (отмечены чёрными элементами).

3. При выполнении i -го снятия из множества M_Σ выбирается множество $M_{\text{вв(сн)}_i}$ равномерно расположенных составов, подлежащих вводу/снятию. Если ввод/снятие производится по двум путям или из/в нескольких депо, то из множества $M_{\text{вв(сн)}_i}$ выбираются равномерно расположенные составы, подлежащие вводу/снятию по каждому из главных путей или из/в каждого депо (отмечены серыми элементами).

4. После выполнения ввода/снятия из множества M_Σ исключаются элементы множества $M_i: M_\Sigma = M_\Sigma \setminus M_{\text{вв(сн)}_i} = M_\Sigma \cap \overline{M_{\text{вв(сн)}_i}}$.

5. Если выполнены не все итерации ввода/снятия, то происходит переход к пункту 3. Повторение операций ввода/снятия продолжается до тех пор, пока из множества M не будут исключены все элементы множества M_Σ .

6. Если все итерации ввода/снятия выполнены, то выполняется выравнивание интервалов движения согласно критерию R_j . В этом случае получаем новое множество M' составов линии, перемещающихся с интервалом движения J_2 .

Разработанная методика позволила создать сценарии автоматизированного построения процессов ПГД.

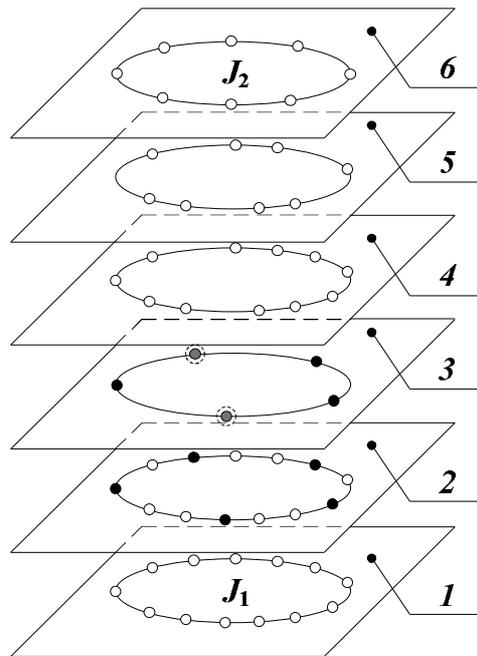


Рисунок 2 – Уровни равномерности при автоматизированном построении ПГД

В третьей главе рассматриваются сценарии построения процессов ПГД Кольцевой линии метрополитена. Описание сценария построения как стационарного, так и переходного процесса выполнено по следующей схеме: исходные данные для построения процесса; особенности процесса; условия реализуемости и реализации процесса; сценарий построения процесса; расчёт количества вариантов построения процесса; переменные состояния процесса. В диссертации отмечены особенности схем сценариев для различных типов линий. В качестве примеров рассмотрим отдельные элементы схем сценариев построения различных процессов ПГД.

Построение процессов ПГД проводится автоматизировано с промежуточным контролем исходных данных для каждого процесса, условий реализуемости и реализации процесса, а также целостности графика.

В соответствии с рекурсивной процедурой автоматизированного построения ПГД (Рисунок 1) построение начинается со стационарных процессов утреннего и вечернего часов «пик». Условием реализуемости этих процессов является соответствие заданной парности движения заданному количеству составов, обслуживающих линию.

Если условия реализуемости процессов часов «пик» выполняются, то эти процессы всегда будут реализованы.

Для утреннего и вечернего часов «пик» возможно построение только одного варианта при заданных исходных данных. Вариативность построения этих процессов может присутствовать в том случае, если время полного оборота составов не кратно заданному интервалу движения (в этом случае варьируются интервалы движения).

Утреннему часу «пик» предшествует переходный процесс, связанный с увеличением парности движения. В этом процессе изменение интервала движения реализуется путём ввода на линию поездов из депо. Целью является минимизация значения критерия R_N .

Одно из условий реализуемости процесса равномерного ввода составов к утреннему часу «пик» заключается в том, чтобы суммарная ёмкость всех точек ночной расстановки, в которых могут ночевать маршруты, приписанные к каждому из депо, была бы не меньше, чем количество маршрутов, приписанных к этому депо:

$$\sum_{j=1}^{N_{NR}} \left(\begin{cases} \mathbf{p}_{NR_j} : c, & \text{если } (\mathbf{p}_{NR_j} : \mathbf{d}_p = \mathbf{d}_k) \vee (\mathbf{p}_{NR_j} : \mathbf{d}_p = \emptyset) \\ 0, & \text{в ином случае} \end{cases} \right) \geq \sum_{i=1}^{N_M} \left(\begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{m}_i : \mathbf{d} = \mathbf{d}_k \\ 0, & \text{в ином случае} \end{cases} \right), \quad k=1 \dots N_d, \quad (2)$$

где N_{NR} – количество точек ночной расстановки на линии;

\mathbf{p}_{NR_j} – j -я точка ночной расстановки;

$\mathbf{p}_{NR_j} : c$ – ёмкость j -й точки ночной расстановки;

$\mathbf{p}_{NR_j} : \mathbf{d}_p$ – депо, маршруты которых могут ночевать в точке ночной расстановки;

\mathbf{d}_k – k -е депо линии;

N_M – общее количество маршрутов линии;

N_d – общее количество депо на линии;

$\mathbf{m}_i : \mathbf{d}$ – депо приписки i -го маршрута.

Условием реализации рассматриваемого процесса является обеспечение заданной парности движения к моменту начала утреннего часа «пик». Эти условия аналогичны условиям, накладываемым на зеркально

симметричные процессы снятия составов после утреннего часа «пик», равномерного ввода составов к вечернему часу «пик», равномерного снятия составов после вечернего часа «пик», где контролируется достижение заданной парности движения в соседних стационарных процессах. Условия реализуемости процессов равномерного снятия составов после утреннего/вечернего часа «пик» включают в себя проверку наличия свободных мест в депо и линейных пунктах технического осмотра (ПТО) для размещения снимаемых составов, обеспечения заданной парности движения в час «непик» и проведения заданных ГО осмотров. Условия реализации включают в себя проверку снятия всех маршрутов, для которых в соответствии с ГО заданы осмотры.

При построении процесса выхода составов из ночной расстановки основным условием реализуемости является контроль равенства количества несвязанных с точками ночной расстановки ниток и невыпущенных из депо или точек ночной расстановки составов.

Условием реализации рассматриваемого процесса является проверка ПГД на отсутствие несвязанных с точками ночной расстановки ниток:

$$\sum_{i=1}^{N_n} \mathbf{n}_i | (\mathbf{n}_i : flgStart = 0 \wedge \mathbf{n}_i : \mathbf{n}_{pn} = \emptyset) = 0. \quad (3)$$

где $\mathbf{n}_i : flgStart$ – компонент последовательности нитка – признак начала движения, определяющий тип маневровых передвижений маршрута до начала движения по нитке.

В том случае, если условие реализации (3) не выполняется, следует вернуться к предыдущему процессу и изменить последовательность ввода составов на линию из депо, либо ввести станционные обороты на промежуточных станциях с путевым развитием.

Условия реализуемости процесса дневного часа «непик» аналогичны условиям реализуемости, сформулированным для часов «пик». В это время реализуются осмотры составов, которые предполагают «размен» составов

через депо или линейные ПТО. Соответствующие маневровые передвижения учитываются в сценарии построения этого процесса ПГД.

Условия реализации процесса ухода на ночную расстановку составов совпадают с условиями успешной реализации построения ПГД и заключаются в следующем:

- в отсутствии ниток, на которые не назначен маршрут;
- в однозначном соответствии назначения маршрутов, выходящих из точки ночной расстановки утром и уходящих в точки ночной расстановки вечером:

$$\sum_{i=1}^{N_M} \begin{cases} 0, & \text{если } (\mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^e = \mathbf{m}_i : \mathbf{m}_N : \mathbf{p}_{NR}^s) = 0, \\ 1, & \text{в ином случае} \end{cases} = 0, \quad (4)$$

где N_m – общее количество маршрутов линии;

\mathbf{m}_i – i -й маршрут;

$\mathbf{m}_i : \mathbf{m}_N$ – следующий маршрут к i -му маршруту линии метрополитена;

$\mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^e$ – компонент последовательности маршрут \mathbf{m}_i – точка ухода на ночную расстановку;

$\mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^s$ – компонент последовательности маршрут \mathbf{m}_i – точка выхода из ночной расстановки.

Построение процесса формализовано путем определения связи исходных данных (предикатов, которые описывают отношения, связывающие те или иные объекты) с регулировочными действиями, которые необходимо выполнить для организации корректной ночной расстановки составов. Зная значения предикатов, можно проверить следующие условия:

- своевременность ухода маршрута к точке ночной расстановки (на выбранную нитку назначен маршрут, который может быть поставлен к указанной точке ночной расстановки без проведения дополнительных маневровых передвижений);

- совпадения маршрутов при назначении (после назначения маршрута на выбранную нитку в ПГД окажется две нитки, по которым одновременно

должен двигаться один и тот же маршрут, это может произойти в случае, когда предыдущий маршрут поставлен к точке ночной расстановки).

Знание о выполнении этих условий позволяет выбрать одно из ЛТП, которое является способом решения задачи постановки маршрута по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки.

Одной из важных характеристик процедуры автоматизированного построения ПГД является количество рассматриваемых вариантов построения каждого из процессов. Максимальное количество вариантов равномерного снятия составов за переходный процесс с учетом вариантов назначения маршрутов Υ_{\max}^S определяется выражением:

$$\Upsilon_{\max}^S = \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{x_{i,j}} \prod_{l=1}^{M_{i,j} - M_{i+1,j}} N_{ijkl}, \quad (5)$$

где N_{ijkl} – количество элементов множества маршрутов, которые могут быть назначены на l -ю снимаемую нитку при выполнении k -го варианта i -го снятия по j -му пути;

I – общее количество снятий составов за переходный процесс;

$M_{i,j}$ – количество составов, которые должны быть на j -м пути линии к началу рассматриваемого интервала времени (процесса ПГД) с порядковым номером i ;

$M_{i+1,j}$ – количество составов, которые должны быть на j -м пути линии к началу следующего за рассматриваемым интервалом времени;

$x_{i,j}$ – количество вариантов реализации i -го снятия по j -му пути:

$$x_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{\text{НОД}(M_{i,j}, M_{i+1,j})}. \quad (6)$$

На Рисунке 3 представлен обобщённый сценарий построения переходных процессов. С целью упрощения восприятия информации, выносимой на схему, действия равномерного ввода/снятия составов к/после часа «пик» названы «регулированием».

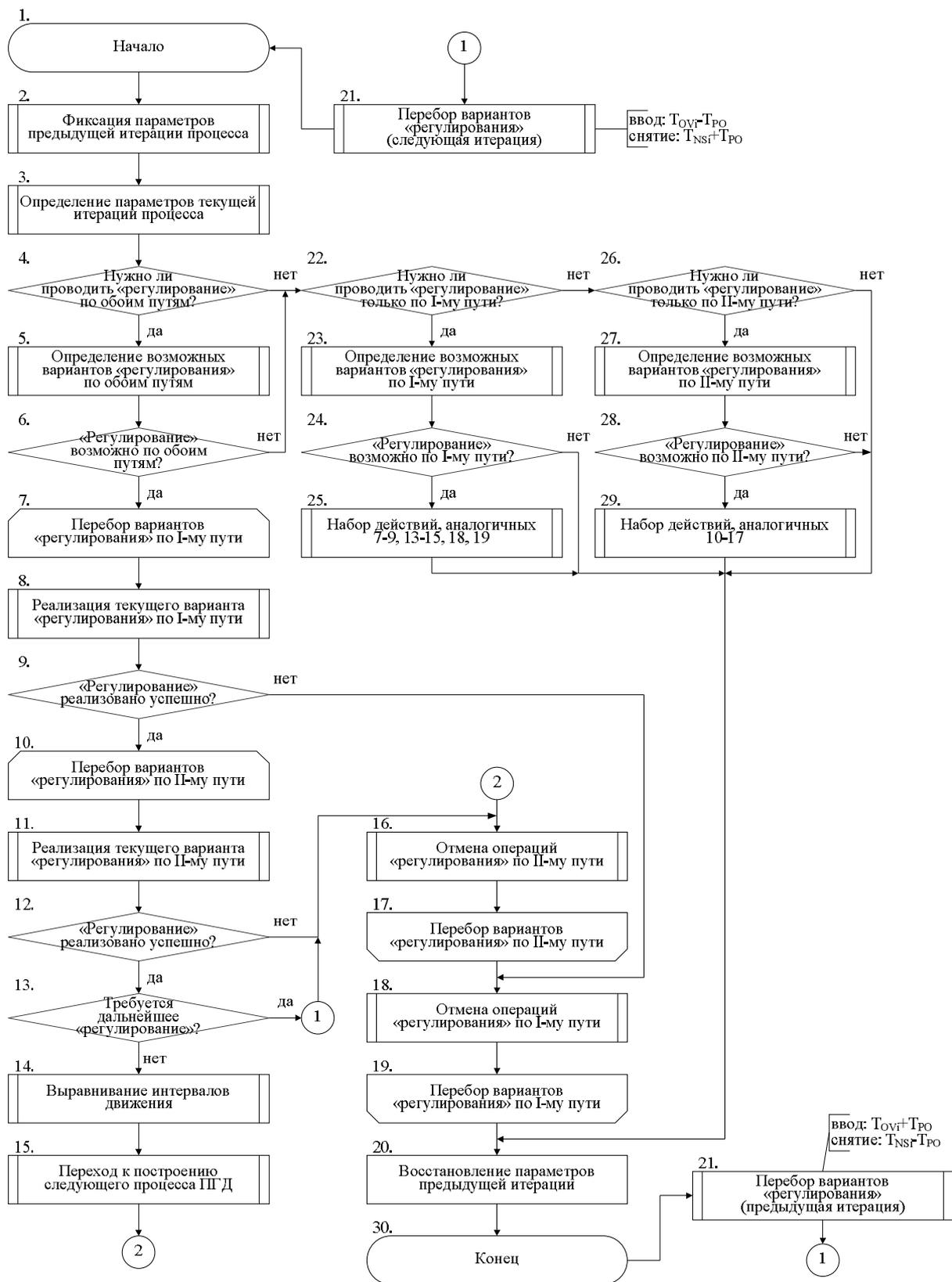


Рисунок 3 – Обобщённый сценарий построения переходных процессов ПГД

Разработанные сценарии позволили реализовать программное обеспечение для автоматизированного построения ПГД.

В четвертой главе представлены результаты применения созданных сценариев построения процессов ПГД для Кольцевой линии в АСП ПГД ППМ,

разработанной на кафедре «Управление и информатика в технических системах» МГУПС (МИИТ) при участии автора диссертации, с использованием результатов, полученных им в работе, и внедренной на Московском метрополитене.

Проверка функционирования разработанных сценариев проведена для различных значений размеров движения, видов ГО и способов ночной расстановкой составов.

Изменение исходных данных оказывает заметное влияние на количество вариантов построения ПГД. Для одного из вариантов исходных данных произведён перебор 2700 вариантов построения ПГД, среди них до процесса ночной расстановки доходит 645 вариантов. Среди них оказывается 35 успешно реализованных вариантов построения ПГД, что составляет 1,3% от общего числа вариантов построения.

Сравнение вариантов ПГД проводится по следующим показателям: количеству разменов маршрутов через депо; количеству регулировочных отстоев на станционных путях линии; общей, средней и максимальной длительностям регулировочных отстоев; времени завершения движения по каждому из главных путей (Рисунок 4). Толстой вертикальной прямой отмечено значение показателя для графика, построенного инженером-графистом вручную.

Проведённый статистический анализ показал, что для подавляющего большинства автоматизировано построенных ПГД нормой является 2–3 регулировочных отстоя; максимальная длительность одного отстоя в этом случае не превышает 2125 с; средняя длительность отстоев не превышает 1445 с; суммарная длительность отстоев на станционных путях линии для подавляющего большинства построенных ПГД не превышает 1,5 часа.

АСП ПГД ППМ дополнена средствами поиска эффективного варианта ПГД из множества успешно реализованных вариантов.

Время, затрачиваемое на:

- загрузку базы данных для построения ПГД при заданных условиях составляет порядка 5 минут;

- внесение изменений в исходные данные для всех процессов ПГД составляет порядка 5–15 минут;

- построение одного успешно реализованного варианта ПГД для Кольцевой линии без коррекции исходных данных составляет 1 минуту;

– на перебор 2700 вариантов составляет 1 час 3 минуты.

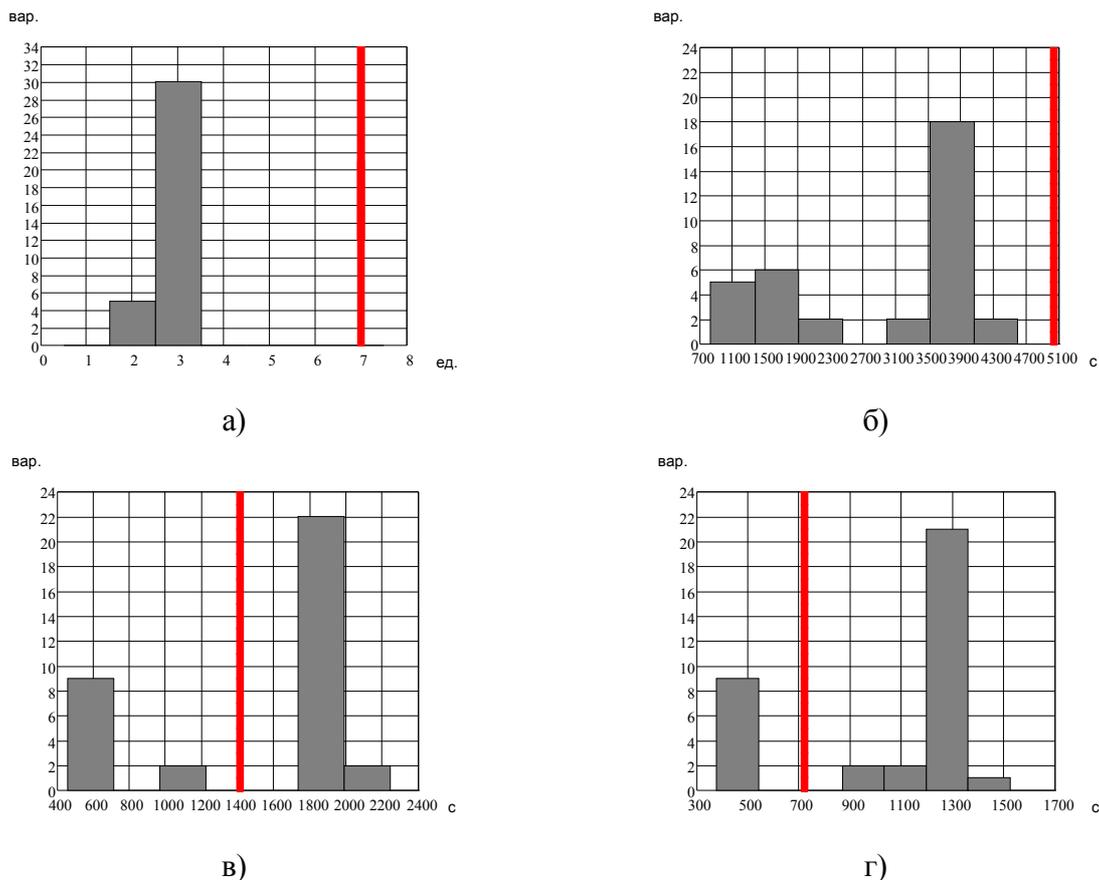


Рисунок 4 – Гистограммы распределения: а) количества регулировочных отстоев в линейных ПТО; б) суммарных длительностей регулировочных отстоев; в) максимальных длительностей регулировочных отстоев; г) средних длительностей регулировочных отстоев.

Временные параметры получены для оборудования, используемого в группе инженеров–графистов Службы движения Московского метрополитена.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

1. Разработаны сценарии автоматизированного построения ПГД пассажирских поездов метрополитена, отличающиеся от известных возможностью построения планового графика, обеспечивающего равномерность расположения поездов на линии при изменении парности движения и равномерность интервалов движения по отправлению поездов со станций в установившихся процессах. Разработанные сценарии позволяют учитывать специфику кольцевых линий, а также реализовать автоматизированное построение ПГД в АСП ПГД ППМ.

2. Специфика сценариев автоматизированного построения ПГД, входящих в состав рекурсивной процедуры и основанных на разработанной методике автоматизированного построения ПГД для линии метрополитена,

позволила организовать нахождение равномерных расположений вводимых/снимаемых составов на длительном промежутке времени и при учёте географии линии, и, следовательно, обеспечить комфортность пассажироперевозок.

3. С целью оценки качества переходных процессов ПГД дополнительно к известным критериям качества введён новый – критерий равномерности расположения вводимых/снимаемых составов. Использование этого критерия при построении ПГД позволяет сократить время выравнивания интервалов движения.

4. В основу процедуры автоматизированного построения ПГД положен полученный метод нахождения равномерных расположений вводимых/снимаемых составов на длительном промежутке времени и при учёте географии линии.

5. Созданы сценарии построения процессов ПГД. Особенностью сценариев является проверка реализуемости и целостности процесса ПГД. По окончании процедуры формально проверяется успешность результата построения процесса.

6. Для учёта особенностей ПГД для Кольцевой линии сформулированы условия реализуемости и реализации процессов ПГД, автоматизирован процесс контроля корректности целочисленных данных, получаемых в процессе построения.

7. Выполнен анализ результатов функционирования рекурсивной процедуры построения ПГД при учёте различных исходных данных, который показал, что доля успешно реализованных вариантов составляет 1,3% от числа рассмотренных. Успешно реализованные варианты построения для одних и тех же исходных данных незначительно отличаются по количеству регулировочных действий. Уменьшение количества регулировочных действий позволяет снизить нагрузку, приходящуюся на системы автоматики метрополитена.

8. Разработанные математическое и программное обеспечение, используемые при изменении в широких пределах исходных данных при построении ПГД показали свою эффективность при учёте изменяющихся условий функционирования линий метрополитена. Разработанные математическое и программное обеспечение показали свою работоспособность на Кольцевой линии метрополитена.

9. В рамках разработанного программного обеспечения реализован единый подход к решению задач построения и редактирования ПГД, определения показателей его качества и обмена данными с другими средствами автоматизации технологических процессов на метрополитене. Выполненное развитие многофункционального человеко-машинного интерфейса обеспечивает эффективность получения информации различного типа и надёжность её хранения и передачи.

10. Анализ результатов построения ПГД для Кольцевой линии при различных исходных данных показал, что полученные ПГД являются рациональными. На графиках, полученных в результате автоматизированного построения, по сравнению с ПГД, составленным вручную, количество регулировочных отстоев сокращено в 2,3 раза, ожидаемая средняя длительность отстоев увеличивается в 2 раза, максимальная – в 1,5 раза.

11. По итогам проведённых экспериментов установлено, что временные затраты на построение одного успешно реализованного варианта ПГД для Кольцевой линии метрополитена с предварительной загрузкой базы данных и вводом исходных данных требуется не более 20 минут. Результаты получены с использованием персональных компьютеров, установленных на рабочих местах инженеров-графистов Службы движения Московского метрополитена. Внедрение АСП ПГД ППМ позволило значительно снизить информационные нагрузки, уменьшить временные и трудовые затраты сотрудников Службы Движения Московского метрополитена.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Сафронов, А. И. Построение планового графика движения для метрополитена / А. И. Сафронов, В.Г. Сидоренко // Мир транспорта. — 2011. — № 3. — С. 98—105.

2. 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.

3. Сафронов, А. И. Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Вестник РГУПС. — 2012. — № 3. — С. 99—104.

4. 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. — Хабаровск: ДВГУПС, 2008. — С. 244—248.

5. 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 : труды научно—практической конференции. — М.: МИИТ, 2008. — С. VII—51—VII—52.

6. Сафронов, А. И. Средства анализа качества исполнения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Неделя науки—2009 : труды научно—практической конференции. — М.: МИИТ, 2009. — С. II—73—II—7.

7. Сафронов, А. И. Формализация задач отображения информации в автоматизированной системе построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. В. Ковалёв // Неделя науки—2009 : труды научно—практической конференции. — М.: МИИТ, 2009. — С. II—49.

8. Сафронов, А. И. Учёт особенностей линий метрополитена при автоматизации построения планового графика движения пассажирских поездов / А. И. Сафронов // Безопасность Движения Поездов : труды X научно—практической конференции. — М.: МИИТ, 2009. — С. X—9—X—10.

9. 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.

10. Сафронов, А. И. Синтез сценариев построения планового графика движения пассажирских поездов Кольцевой линии метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Проблемы регионального и муниципального управления : сборник докладов Международной научной конференции. — М.: РГГУ, 2010. — С. 166—170.

11. Сафронов, А. И. Оптимизация процедур визуализации графиков движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов // TRANS—MESH—ART—CHEM» : труды VII Международной научно—практической конференции. — М.: МИИТ, 2010. — С. 315—317.

12. Сафронов, А. И. Автоматизированное построение этапов подготовки перевозочного процесса на линии метрополитена к движению с максимальной парностью / А. И. Сафронов // Неделя науки–2011 : труды научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–141–III–142.

13. Сафронов, А. И. Комплекс программ автоматизированного синтеза и печати поездных расписаний для пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, Т. Ю. Александрова // Неделя науки–2011 : труды научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–123.

14. Сафронов, А. И. Автоматизированный синтез планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на стадии выхода из ночной расстановки / А. И. Сафронов // Безопасность Движения Поездов : труды XI научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2010. – С. II–3–II–4.

15. Сафронов, А. И. Синтез планового графика движения пассажирских поездов метрополитена, выходящих из ночной расстановки / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем: труды XVIII Международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 454–457.

16. Сафронов, А. И. Условия реализации и реализуемости при автоматизированном построении планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов // Неделя науки–2011 : труды научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–157–III–158.

17. Сафронов, А. И. Анализ планового графика движения пассажирских поездов московского метрополитена / А. И. Сафронов, Пью Хтет Вин // Неделя науки–2011 : труды научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–157.

18. Сафронов, А. И. Расчет эксплуатационных показателей и критериев качества планового графика движения пассажирских поездов линии метрополитена / А. И. Сафронов, Пью Ту Со // Неделя науки–2011 : труды научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–156.

19. Сафронов, А. И. Создание интерфейса и информационного обеспечения автоматизированного рабочего места инженера по эксплуатации электродепо метрополитена / А. И. Сафронов, Н. Л. Солдатов, К. А. Ушаков, Д. И. Харчилин, М. В. Чайковский // Неделя науки–2011 : труды научно–практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–159.

20. Сафронов, А. И. Уровни успешной реализации автоматизированного

построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена и критерии отбора эффективных результатов / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем: труды XIX Международной конференции. — М.: РГГУ, 2011. — С. 307—311.

21. Сафронов, А. И. Автоматизированное построение процесса ухода составов на ночную расстановку при учёте уровней равномерности / А. И. Сафронов // Безопасность Движения Поездов : труды XII научно-практической конференции. — М.: МИИТ, 2011. — С. IX—12—IX—13.

22. Сафронов, А. И. Анализ быстродействия алгоритмов автоматизированного построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ'12) : программа Международной конференции. — М.: ИПУ РАН, 2012. — С. 76.

23. Сафронов, А. И. Взаимосвязь графика оборота подвижного состава с плановым графиком движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов // Безопасность Движения Поездов : труды XIII научно-практической конференции. — М.: МИИТ, 2012. — С. II—6.

24. Сафронов, А. И. Интеллектуальная автоматизированная система планирования перевозочного процесса на метрополитене / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // ИСУЖТ-2012 : труды I научно-технической конференции. — М.: ОАО «НИИАС», 2012. — С. 99—104.

Сафронов Антон Игоревич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА
КОЛЬЦЕВОЙ ЛИНИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КРИТЕРИЕВ РАВНОМЕРНОСТИ

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

Подписано к печати _____

Объем 1,5 п.л.

Формат 60x84/16

Тираж 80 экз. Заказ № _____

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