

УДК 656.22

Т. А. Искаков

А. И. Сафронов, канд. техн. наук

В. Г. Сидоренко, д-р техн. наук

М. А. Чжо, канд. техн. наук

*Кафедра «Управление и защита информации»,
Российский университет транспорта, Москва*

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

В статье проанализированы способы оценки качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена и их связь с этапами жизненного цикла планового графика движения. Рассмотрены варианты описания результатов планирования движения поездов метрополитена, показана связь выбора одного из них с содержанием решаемых задач управления. Выявлены параметры планового графика движения, влияющие на его устойчивость в «большом» и «малом» и качество управления в соответствии с критериями качества и целями управления. Проведен анализ результатов применения ортогональных преобразований к разным моделям планового графика движения. Предлагаемая авторами оценка качества с использованием ортогональных преобразований показала свою эффективность для оценки равномерности движения и соблюдения заданной парности движения. Такой способ представления информации может служить промежуточным вариантом между развернутым и «трудным для обзора одним взглядом» способом классического представления результатов планирования движения пассажирских поездов метрополитена и сильно сжатым и усредненным описанием при помощи эксплуатационных измерителей и интегральных показателей качества.

метрополитен, устойчивость, плановый график движения, дискретное преобразование Фурье, спектр

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63

Введение

При проектировании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на транспорте особое внимание уделяется работоспособности системы при повышенных нагрузках, а также способности сохранять штатный режим работы при воздействии возмущающих факторов и восстанавливать штатный режим после прекращения воздействия таких факторов, т. е. устойчивости системы и качества управления [1]. В различных отраслях знаний и экономики существуют разнообразные, хотя и родственные определения понятия устойчивости, методы ее оценки

и классификации. Данная статья посвящена вопросам оценки устойчивости систем управления движением пассажирских поездов метрополитена и качества управления в них.

Результатом планирования функционирования транспортной системы является плановый график движения (ПГД), например, пассажирских поездов метрополитена (ППМ) [2], который является основой управления движением. Применительно к ПГД под устойчивостью (в отличие от понятия устойчивости, в частности, по Ляпунову) будем понимать возможность восстановления движения в соответствии с ПГД, выполнения требований графика оборота (ГО) электроподвижного состава (ЭПС) и ночной расстановки составов после ликвидации причины сбоя.

Рассмотрим понятие устойчивости в «малом» и «большом» применительно к процессам планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена. Устойчивым режимом работы в «малом» называют такой режим, при котором незначительное отклонение от исходного равновесного состояния со временем уменьшается и система возвращается в равновесное состояние. Под устойчивым режимом работы в «большом» подразумевают такой режим, при котором система, получив достаточно большое начальное возмущающее воздействие и имея значительное отклонение от исходного равновесного состояния, возвращается в него после прекращения действия возмущения. Устойчивость ПГД в «малом» и в «большом» можно рассмотреть с точки зрения классификации сбоев в движении поездов. Выделяют малые и большие сбои [3–7]. Малыми называют сбои, которые приводят к таким отклонениям от ПГД, компенсация которых производится только за счет изменения длительности стоянки поездов на станциях и времен прохождения перегонов. Под большими сбоями понимаются ситуации, при которых вышеперечисленных мер недостаточно для восстановления движения по ПГД, поэтому производятся внеплановые обороты составов на станциях с путевым развитием и (при необходимости) внеплановое удаление составов с линии в депо.

1. Методы оценки качества ПГД

Методы определения устойчивости различаются в зависимости от типа системы [8]. Транспортные системы, в частности метрополитены, являются сложными нелинейными нестационарными системами. Единых аналитических подходов к оценке устойчивости системы для них не существует; как правило, используется имитационное моделирование [3–5, 9, 10]. Имитационное моделирование позволяет учесть максимальное количество факторов, влияющих на управление движением поездов на линии метрополитена. В работе [9] представлены принципы построения, основные достоинства и свойства многофункциональных комплексных моделей систем управления. Эффективность этих моделей заключается в возможности сравнения и выбора различных технических и технологических решений на стадии формирования технического

задания с целью выбора лучшего решения на базе проведения имитационных экспериментов. Подобные модели являются основой таких средств автоматизации управления движением поездов метрополитена, как:

- автоматизированная система оперативного диспетчерского управления движением поездов [5, 11, 12];
- тренажер поездного диспетчера линии метрополитена [13, 14];
- автоматизированная система энергооптимальных тяговых расчетов [15–18];
- автоматизированная система построения ПГД ППМ [19–25];
- автоматизированная система оценки эффективности использования рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена и накопителей энергии [16, 26] и др.

Оценка устойчивости при помощи имитационного моделирования совмещается или предваряется численной оценкой качества ПГД по тем критериям, которые оказываются значимыми при воздействии возмущающих факторов [5, 27, 28].

В статье предложен еще один способ оценки качества ПГД с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и вейвлет-анализа [29], который расширяет возможности автоматизированного предварительного анализа качества результатов построения ПГД и ГО и способствует улучшению результатов их эксплуатации.

Выбор того или иного способа оценки устойчивости и качества ПГД зависит от целей и имеющихся инструментов такой оценки, способен влиять на качество принимаемых управленческих решений. Степень сжатия информации и форма представления может находиться в противоречии с ее полнотой, качеством и удобством для восприятия и использования. Следовательно, необходимо соблюдать баланс между размерностью информации и уровнем ее качества.

ПГД, как и любой продукт, имеет жизненный цикл, *V*-образная модель которого представлена на рисунке 1.

На каждом этапе жизненного цикла возможны свои подходы к оценке качества ПГД.

При подготовке исходных данных для автоматизированного построения ПГД и ГО проводится проверка условий реализуемости ПГД с заданными параметрами, например:

- наличие в необходимом количестве ЭПС и достаточной пропускной способности всех участков линии для обеспечения заданной максимальной парности движения при заданном времени хода по линии метрополитена. В случае невыполнения этого условия применяются средства, позволяющие парировать данное возмущение, в частности введение графика зонного типа (ГЗТ) [30];
- наличие в достаточном количестве ресурсов для выполнения требований ГО ЭПС [31];
- равномерность пассажиропотока на всех участках линии. На конечных участках линии метрополитена пассажиропоток может быть гораздо меньше,

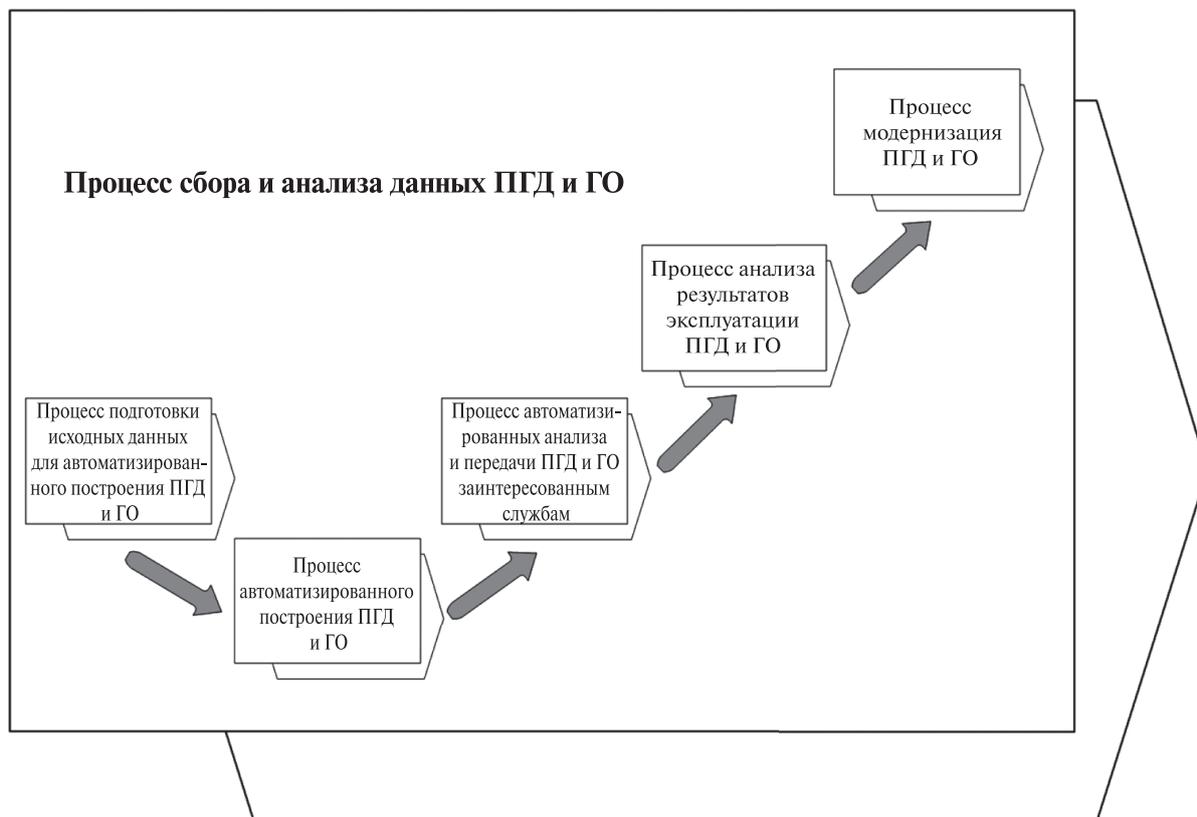


Рис. 1. V-образная модель жизненного цикла ПГД и ГО

чем на центральном, либо может наблюдаться значительное увеличение пассажиропотока на некотором участке линии при проведении крупномасштабного культурно-массового мероприятия [10, 30, 32]. В этих случаях анализируется необходимость и возможность поддержания одинаковой парности на всем протяжении линии и рациональность введения ГЗТ.

В ходе автоматизированного построения ПГД и ГО проверяется выполнение условий реализуемости и реализации каждого процесса ПГД, успешной реализации ПГД в целом, вычисляются значения критериев равномерности ввода/снятия составов, интервалов движения, равномерности проведения осмотров и ремонтов ЭПС [28, 31].

В ходе автоматизированного анализа и передачи ПГД и ГО заинтересованным службам после успешного построения ПГД и ГО проводится расчет эксплуатационных измерителей и интегральных показателей качества для ПГД. На данном этапе эффективно применение имитационного моделирования для анализа устойчивости ПГД к различным возмущающим факторам [5, 9, 27, 28].

Предлагаемая авторами оценка качества ПГД с использованием ДПФ и вейвлет-анализа может показать свою эффективность на этом и последующих этапах для оценки равномерности и соблюдения заданной парности движения.

Одновременно такой способ представления информации, на взгляд авторов, является компромиссом между развернутым и «трудным для обзора одним взглядом» способом классического представления ПГД и сильно сжатым и усредненным описанием при помощи эксплуатационных измерителей и интегральных показателей качества. Этот способ может оказаться перспективным при построении интеллектуальных централизованных систем управления, т. к. синтез законов управления, ими реализуемых, как правило, включает в себя анализ системы в частотной области [1, 4, 8].

Анализ результатов эксплуатации ПГД и ГО предусматривает сравнение ПГД и ГИД, вычисление значений эксплуатационных измерителей для ГИД и сравнение с плановыми значениями [5].

При модернизации ПГД и ГО эффективно использовать имитационное моделирование для предварительной оценки влияния предложенных решений по модернизации ПГД на его устойчивость.

2. Формализованное описание ПГД

Рассмотрим математическую формализацию ПГД, применимую как для описания замкнутых систем централизованного автоматического управления движением поездов метрополитена, так и для использования ДПФ и вейвлет-анализа с целью оценки качества планирования и управления движением [4, 28].

Движение маршрутов (маршрут \tilde{n} — это состав с присвоенным ему на сутки номером, который определяет его движение в соответствии с ПГД и ГО) по линии метрополитена, включая нахождение в депо, пунктах осмотра и отстоя, точках ночной расстановки, может быть однозначно описано множеством Y , которое включает в себя зависимости кортежей фазовых переменных от времени для всех маршрутов:

$$Y = \left\{ \left(p_i(t), x_i(t), v_i(t), m_i(t) \right), i = 1, 2, \dots, N_c \right\}, \quad (1)$$

где p_i — целочисленная переменная, обозначающая путь, на котором находится i -й маршрут; x_i — смещение местоположения i -го маршрута относительно начала отсчета на пути p_i ; v_i — скорость движения i -го маршрута; m_i — лингвистическая переменная, обозначающая состояние i -го маршрута; N — число маршрутов.

Существуют следующие состояния маршрутов c , осуществляющих движение по главным путям станции.

- При нахождении на главных путях:
 - движение по главным путям станции (LD);
 - стоянка на станции;
 - ◆ плановая стоянка для посадки и высадки пассажиров (LO);
 - ◆ сверхрежимная выдержка на станции (LOS);
 - ◆ ночная расстановка (LN).
- При нахождении на станционных путях или в депо:
 - движение (SD, DD);
 - стоянка не на станции:

- ◆ регулировочный отстой (SO, DO);
- ◆ ремонт j -го типа (SR_j, DR_j);
- ◆ ночная расстановка (SN, DN).

Таким образом, ПГД может быть отображен N_c траекториями в пятимерном пространстве (t, p, x, v, m) .

Представить результаты синтеза ПГД в форме, удобной для планирования движения и управления как отдельно взятым составом (на основе расписания движения), так и всей совокупностью составов на линии (на основе ПГД), позволяющей формализовать критерии качества графика, можно используя понятия элемента расписания, нитки и ремонта [28]. Такая форма описания ПГД является обратной к исходной. Независимая переменная «время» (прибытия или отправления) становится значением функции, зависящим от независимой переменной «номер поезда» или «номер маршрута» при фиксированных значениях p и x , задающих местоположение конкретной точки линии, например точки остановки головы состава на платформе станции или у точки ночной расстановки составов. Этот способ формализации задачи автоматизированного построения ПГД показал свою обоснованность для описания ПГД, поскольку он учитывает связи объектов линии друг с другом и возможность изменения количества составов на линии. Он использован для расчета значений критериев равномерности, формализации условий реализуемости и реализации построения процессов ПГД, а также ввода иных математических соотношений, на которых основываются разработанные сценарии построения процессов ПГД. Эта форма описания иллюстрируется классическим графическим представлением ПГД (рис. 2).

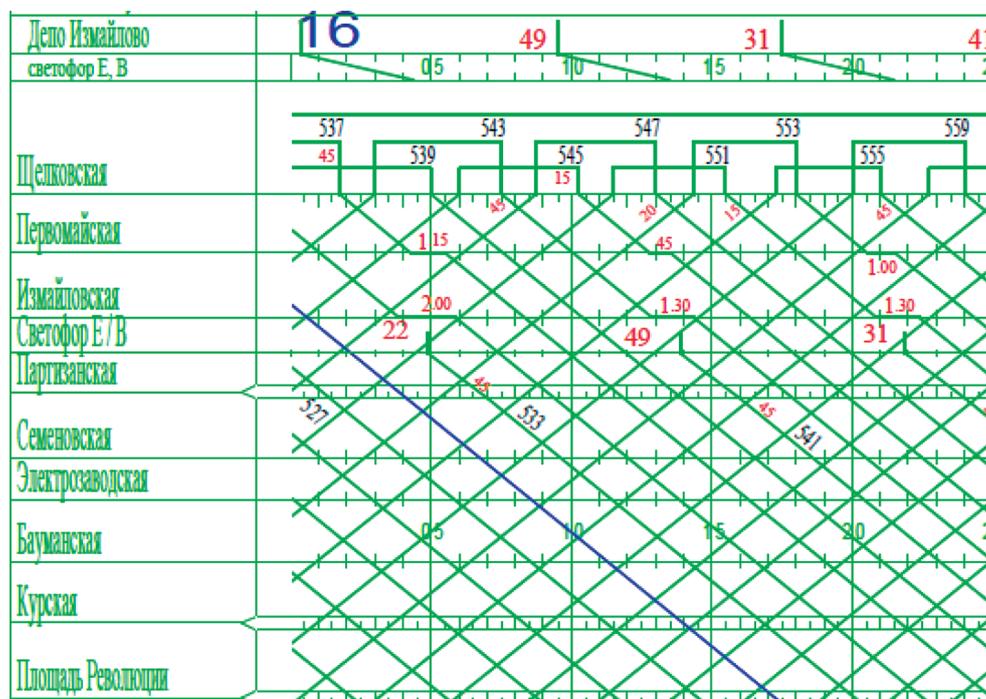


Рис. 2. Фрагмент ПГД

Если ставится задача описать процесс управления поездом метрополитена с использованием терминов классической теории управления, удобно в качестве независимой переменной снова взять время и уменьшить размерность пространства. Предложенная в данной работе формализация позволяет от описания с использованием четырех функций перейти к описанию с использованием двух функций времени.

На рисунке 3 представлены варианты модели движения поездов через платформу: $s = f(p, x)$. Факт нахождения поезда на платформе индицируется в виде импульсов, где ширина импульса T_s — длительность стоянки поезда на станции, интервал времени между моментами начала соседних импульсов T_a — интервал движения по прибытию. Соответственно, интервал времени между моментами окончания соседних импульсов T_d — интервал движения по отправлению. Это функция дискретного времени $c[s, t]$, в которой отсчеты заданы с шагом дискретизации 5 секунд. Высота импульса на рисунке 3 равна номеру маршрута, прибывшего на платформу. На рисунке 4 высота импульса равна единице, т. е. просто индицирует факт нахождения состава на платформе. К варианту $tr[s, t]$, представленному на рисунке 4, удобно применять ДПФ, чтобы получить спектр сигналов для каждой станции.

Для полного описания движения вводится вторая функция $m[s, t]$, отражающая зависимость направления движения поезда, прибывшего на платформу, от времени. В этом случае по оси ординат откладываются числовые эквиваленты лингвистических переменных m_i .

Предложенная авторами модель описания ПГД может найти применение при построении структуры и алгоритмов централизованных систем автоматического управления движением поездов метрополитена (ЦСАУДПМ). Эти системы

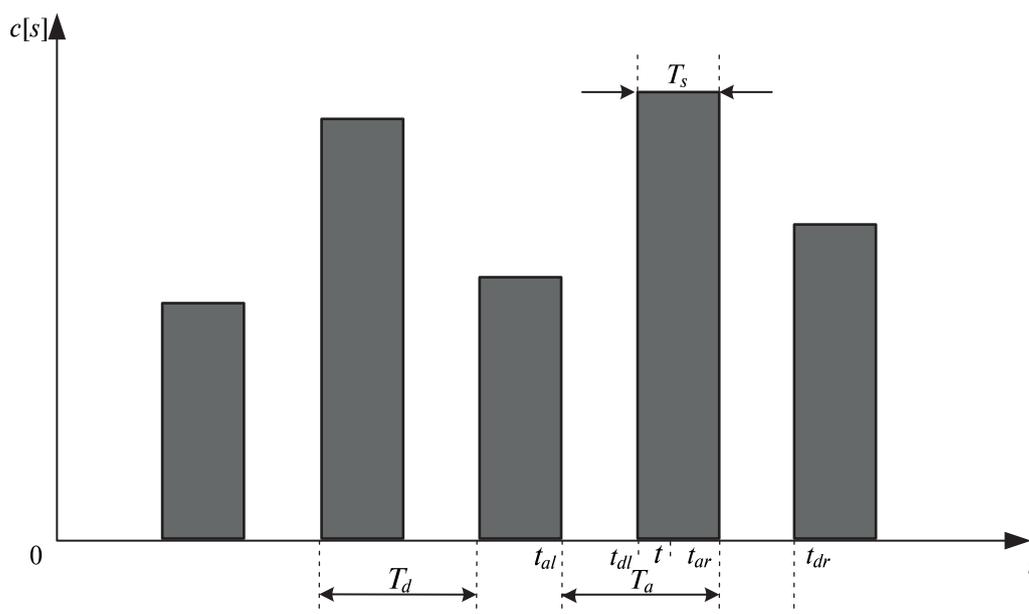


Рис. 3. Иллюстрация модели движения маршрутов через платформу

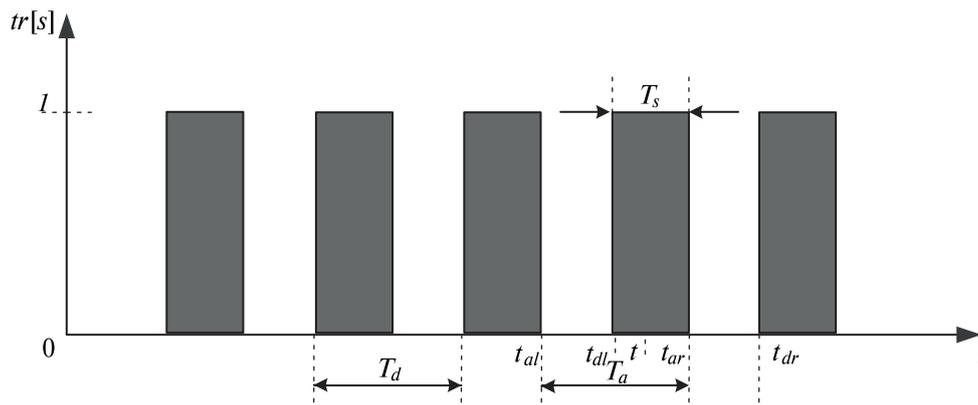


Рис. 4. Иллюстрация модели движения составов через платформу

реализуют интервальные и графичево-интервальные алгоритмы управления [4, 5, 9, 10], которые, в отличие от графиковых алгоритмов, реализуют обратную связь и формируют команду на отправление маршрута со станции на основе информации, получаемой из ПГД, о плановых направлениях движения и местоположениях поездов и из автоматизированных систем считывания номеров поездов о реальном местоположении поездов. Это нашло отражение на структурной схеме, представленной на рисунке 5.

Одновременно такой способ описания ПГД удобен при организации работы устройств системы маршрутно-релейной централизации (МРЦ) по подготовке

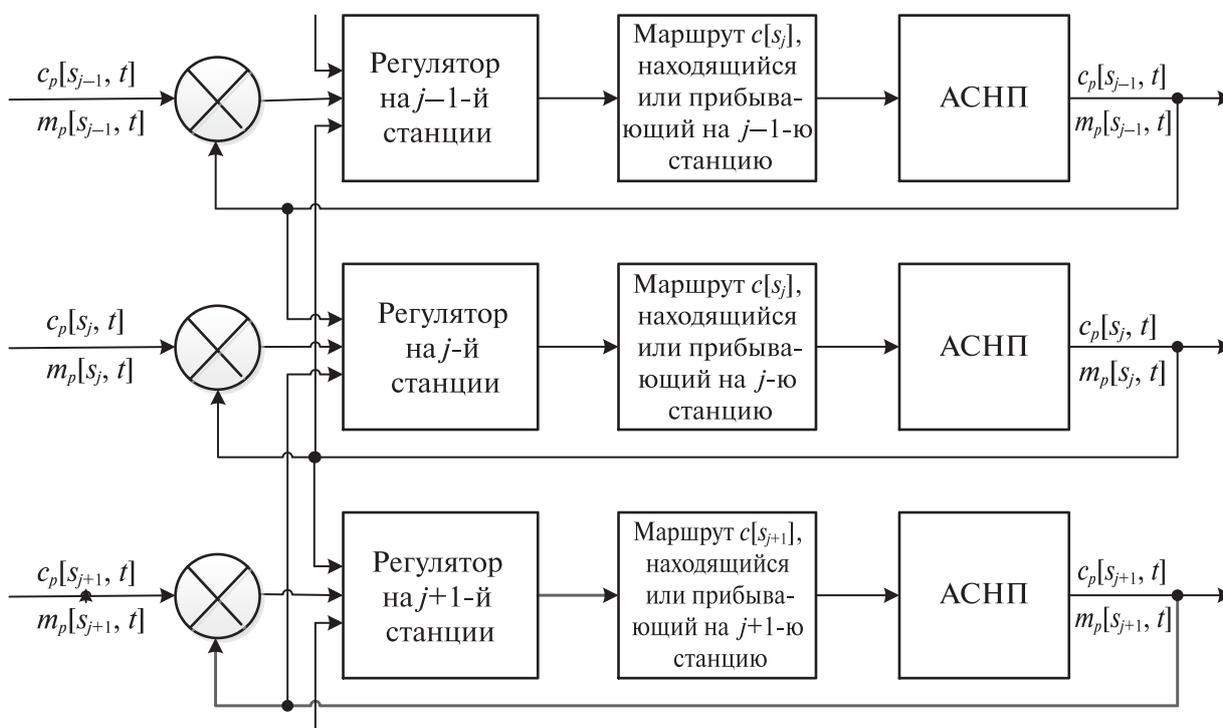


Рис. 5 Структурная схема ЦСАУДПМ

пути для прохождения поездов в соответствии с ПГД в автоматическом режиме. Он устанавливает жесткое соответствие между элементами ПГД и работой устройств МРЦ [2, 32–36], т. к. последовательности задания маршрутов системы МРЦ и авторежимов $a[s, t]$, собираемых на станции s , являются последовательностью значений функционалов F_r и F_a , примененных к функции $m[s, t]$ на некотором промежутке времени:

$$r[s, t] = F_r(m[s, \tau], t_{al} \leq \tau \leq t_{ar}), \quad (2)$$

$$a[s, t] = F_a(m[s, \tau], r[s, t], a[s, \tau], t_{dl} \leq \tau \leq t_{dr}), \quad (3)$$

где t_{al} — момент времени, в который происходит ближайший слева к моменту времени t переход функции $m[s, \tau]$ из ненулевого состояния в нулевое ($t_{al} | [(m[s, t_{al}^-] > 0) \text{ and } (m[s, t_{al}^+] = 0)]$) (рис. 3, 4); t_{ar} — момент времени, в который происходит ближайший справа к моменту времени t переход функции $m[s, \tau]$ из ненулевого состояния в нулевое ($t_{ar} | [(m[s, t_{ar}^-] > 0) \text{ and } (m[s, t_{ar}^+] = 0)]$); t_{dl} — момент времени, в который происходит ближайший слева к моменту времени t переход функции $m[s, \tau]$ из нулевого состояния в ненулевое ($[t_{dl} | (m[s, t_{dl}^-] = 0) \text{ and } (m[s, t_{dl}^+] > 0)]$); t_{dr} — момент времени, в который происходит ближайший справа к моменту времени t переход функции $m[s, \tau]$ из нулевого состояния в ненулевое ($t_{dr} | [(m[s, t_{dr}^-] = 0) \text{ and } (m[s, t_{dr}^+] > 0)]$).

3. Параметры ПГД, влияющие на его устойчивость

При планировании движения ППМ выделяются следующие цели управления [4, 5, 27, 28, 38, 39]:

- реализация заданной (изменяющейся во времени) парности движения в течение всего времени движения пассажирских поездов;
- правильность ночной расстановки (все маршруты должны завершить свое движение в тех точках ночной расстановки, из которых на следующий день начинается движение следующих маршрутов, до заданного момента времени или за минимальное время после завершения пассажирского движения);
- реализация ГО.

Поставленные цели определяют перечень рассчитываемых эксплуатационных показателей и интегральных показателей качества.

К эксплуатационным измерителям относятся: количество поездов, поездо-километры, вагоно-километры, нулевой пробег, вагоно-километры нулевого пробега, пробег с нулевым, поездо-часы в движении, простой, поездо-часы, эксплуатационная скорость, техническая скорость, количество задействованных в ПГД составов.

Для оценки факторов, влияющих на устойчивость ПГД, могут использоваться следующие интегральные показатели:

- количество разменов маршрутов через депо;
- параметры регулировочных отстоев на станционных путях линии (количество, общая (суммарная), средняя, максимальная длительности и другие параметры регулировочных отстоев);
- время завершения движения по каждому из главных путей;
- параметры ГЗТ или ввода/снятия составов на промежуточных станциях;
- параметры станционных оборотов составов на конечных и промежуточных станциях;
- параметры ГО, а именно интервалы времени между осмотрами и их продолжительность.

Показатели качества, связанные с регулировочными отстоями и разменами, определяют степень свободы поездного диспетчера при выборе управленческих решений. Чем больше разменов и их длительность, тем меньшей свободой обладает поездной диспетчер для назначения маневровых передвижений (оборотов составов на промежуточных станциях), которые составляют основу управления в случае «больших» сбоев [3, 5, 33].

Параметры ГЗТ и станционных оборотов, а также параметры ГО определяют запас устойчивости ПГД, т. е. склонность движения поездов по линии к отклонению от ПГД даже при очень малых возмущениях, вызванных:

- различием длительностей стоянки поезда на станции для полного освобождения состава от пассажиров и стоянки поезда на обычной промежуточной станции, а также посадки пассажиров в пустой состав;
- невыполнением ограничения на величину «захлеста» T_3 — интервала времени между моментами отправления поезда с начальной станции пути или после оборота на промежуточной станции и прибытия на другую платформу той же станции маршрута, который будет отправляться следующим после оборота. Это ограничение можно выразить следующим образом (рис. 6):

$$\begin{aligned} T_0^{\min} \leq T_0, \quad T_3 \leq T_3^{\max}, \quad T_0 = T_3 + T_d, \\ T_0^{\min} \leq T_3 + T_d, \quad T_0^{\min} - T_d \leq T_3 \leq T_3^{\max}, \end{aligned} \quad (4)$$

где T_0 — длительность станционного оборота с одного пути станции на другой; T_0^{\min} — минимальное время станционного оборота на заданной станции при заданном числе локомотивных бригад, участвующих в организации работы станции с путевым развитием; T_3^{\max} — максимальная длительность «захлеста».

При наличии отклонений в ПГД оперативное управление линией должно осуществляться с учетом ограничений на управление в зависимости от состояния системы [5]. Для этого необходимо определить пропускную способность участков линии метрополитена между двумя соседними станциями с путевым развитием. Пропускная способность участка линии метрополитена позволяет

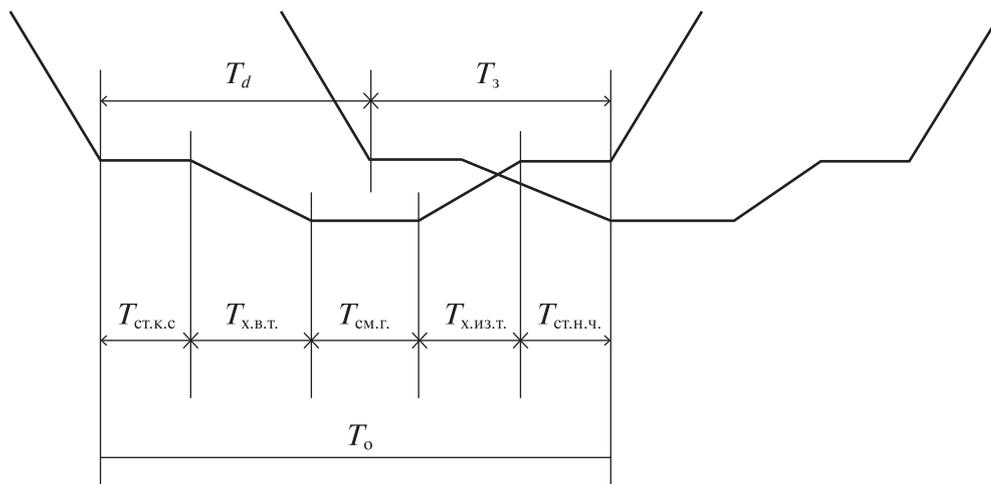


Рис. 6. Организация оборота составов на станциях с путевым развитием ($T_{ст.к.с.}$ — время стоянки на конечной станции пути, по которому двигался маршрут до оборота; $T_{х.в.т.}$ — время хода в тупик; $T_{см.г.}$ — время смены головы; $T_{х.из.т.}$ — время хода из тупика; $T_{ст.н.ч.}$ — время стоянки на начальной станции пути, по которому будет двигаться маршрут после оборота)

определить такое максимально допустимое число поездов на этом участке, при котором все поезда на участке будут всегда следовать на разрешающие показания светофоров. Имеются следующие ограничения на управление:

- минимальный интервал движения по отправлению;
- минимальное время хода по перегону, которое определяется характеристиками перегона (планом, профилем, допустимыми скоростями) и подвижного состава;
- минимальное время стоянки поезда на станции, которое определяется необходимым временем для высадки пассажиров на станции.

Решение этой задачи возможно путем проведения имитационных экспериментов [5, 40]. Оно позволяет найти грань между устойчивостью ПГД «в малом» и «в большом».

Существуют алгоритмы управления [3–5, 10, 26], помогающие эффективно восстановить устойчивость при малых сбоях и довольно быстро войти в график при небольших отклонениях от ПГД. Однако при больших сбоях они неэффективны из-за ограниченности ресурса нагона или отставания от ПГД (факторы, позволяющие восстановить устойчивость ПГД «в малом»). Эти факторы можно рассматривать как некий аналог «запаса по устойчивости». Они определяются суммированием ресурса уменьшения (увеличения) длительности стоянок поездов на станциях и ресурсов уменьшения (увеличения) времени хода по перегону. Для повышения устойчивости ПГД к воздействию возмущающих факторов необходимо выполнять распределение времени хода по линии на время хода по перегонам с учетом необходимости наличия ресурсов нагона или отставания. Выбор того или иного способа управления зависит от величины рассогласования ПГД и графика исполненного движения (ГИД).

Анализ статистики показывает, что большинство сбоев в движении поездов метрополитена связано с возмущениями, вызванными пассажирами [4, 10, 32], поэтому столь большое значение при планировании движения поездов уделяется планированию длительности стоянок поездов на станциях.

ГИД позволяет оценить качество управления движением поездов метрополитена и устойчивости ПГД к воздействию возмущающих факторов. По этому документу определяются фактические значения парности и интервалов движения, критериев качества и эксплуатационных измерителей. Если в графике присутствует сбой, дополнительно оцениваются [7]:

— отставание поездов от планового времени прибытия и отправления с конечных станций линии:

- время опоздания;
- количество опоздавших поездов;

— факт и длительность стоянок поездов с пассажирами на перегоне (количество остановок по сигналам систем интервального регулирования движения поездов);

— реализация графика:

- количество отмененных поездных ниток;
- процент выполнения графика движения поездов или коэффициент реализации графика (отношение количества фактических прибытий поездов на станции к количеству плановых прибытий на станции);

— равномерность движения поездов при управлении в случае сбоя (отсутствие резкого изменения интервалов движения):

• коэффициент реализации заданных интервалов движения по прибытию (отношение среднего планового интервала движения по прибытию и среднего фактического интервала движения по прибытию);

• коэффициент реализации заданных интервалов движения по отправлению (отношение среднего планового интервала движения по отправлению и среднего фактического интервала движения по отправлению);

— время восстановления графика (с момента ликвидации причины сбоя до возвращения последнего поезда в график) — время вхождения в график.

4. Оценка качества ПГД с использованием ортогональных преобразований

В ходе исследования проводилось сравнение результатов применения различных ортогональных преобразований к моделям, описанным в пункте 2 этой статьи и проиллюстрированным рисунком 4, «эталонного» (построенного строго по заданным размерам движения с постоянной длительностью стоянки поездов на станциях) и реального ПГД ППМ для некоторых линий Московского метрополитена.

В ходе анализа результатов применения ДПФ к этим двум моделям сделаны следующие выводы.

Спектр «эталонного» ПГД ППМ содержит ярко выраженные максимумы, соответствующие заданным размерам движения (рис. 7, *a* и 8, *a*). Амплитуда этих максимумов определяется суммарной длительностью интервалов времени в течение дня, на которых поддерживается одна и та же парность движения. В связи с тем, что в выходные дни максимальная для этих дней парность движения (для рассматриваемых графиков это 22 пары в час, при этой парности интервал движения поездов равен 165 с) поддерживается на протяжении более продолжительного времени, чем в рабочие дни; максимумы, соответствующие этим парностям, выше, чем в рабочие дни.

Спектр реального ПГД ППМ также содержит выраженные максимумы, соответствующие заданным размерам движения (рис. 7, *б* и 8, *б*), но их амплитуда значительно ниже. Это связано с отклонением плановых интервалов движения от заданных, характерным для переходных процессов ПГД. Значения амплитуд спектра реального ПГД на частотах, которым соответствуют нулевые значения амплитуд на спектре «эталонного» ПГД, могут быть отличны от нуля, т. е. наблюдается размытие спектра ПГД. На ПГД на рабочие дни это явление выражено ярче, чем на ПГД на выходные дни. Это связано с тем, что в рабочие дни переходные процессы ПГД имеют большую продолжительность [2, 28].

В некоторых случаях максимумы могут перемещаться на соседние частоты. Это объясняется тем, что заданная парность движения реализуется не всегда при постоянном интервале движения поездов, соответствующем этой парности, а путем варьирования различных интервалов движения (рис. 7, *в* и 8, *в*).

Аналогичный эффект размытия получается, если в «эталонный» ПГД внести случайную составляющую, выраженную в отклонении интервала движения от заданного (рис. 9).

Огибающая спектров как «эталонного», так и реального ПГД близка по форме к функции отсчетов, параметры которой определяются плановой длительностью стоянки на станциях (для рассматриваемых графиков это 25 с). Степень этой близости различается в зависимости от количества сверхрежимных выдержек, предусмотренных ПГД. Поэтому ближе всего по форме к функции отсчетов спектры «эталонных» ПГД, затем — реального ПГД на выходные дни. Удаленность огибающей спектра реального ПГД на рабочие дни от функции отсчетов также выражается в его размытии.

Интерес представляют результаты анализа спектров реальных ПГД ППМ по отдельным станциям линии. Этот анализ позволяет классифицировать станции по степени изменения интервала движения.

Станции, предшествующие станциям массового ввода/снятия составов и следующие за ними, характеризуются наименьшим соблюдением заданного интервала движения, т. е. большим размытием спектра. Это связано с необходимостью выполнения сверхрежимных выдержек для обеспечения максимальной равномерности движения на станциях ввода/снятия составов (рис. 10, *a*). Большое размытие спектра, а значит, сильное изменение интервалов движения и слабое соблюдение заданного характерно для начальных станций линий, если станции массового ввода/снятия составов удалены от них (рис. 10, *б*).

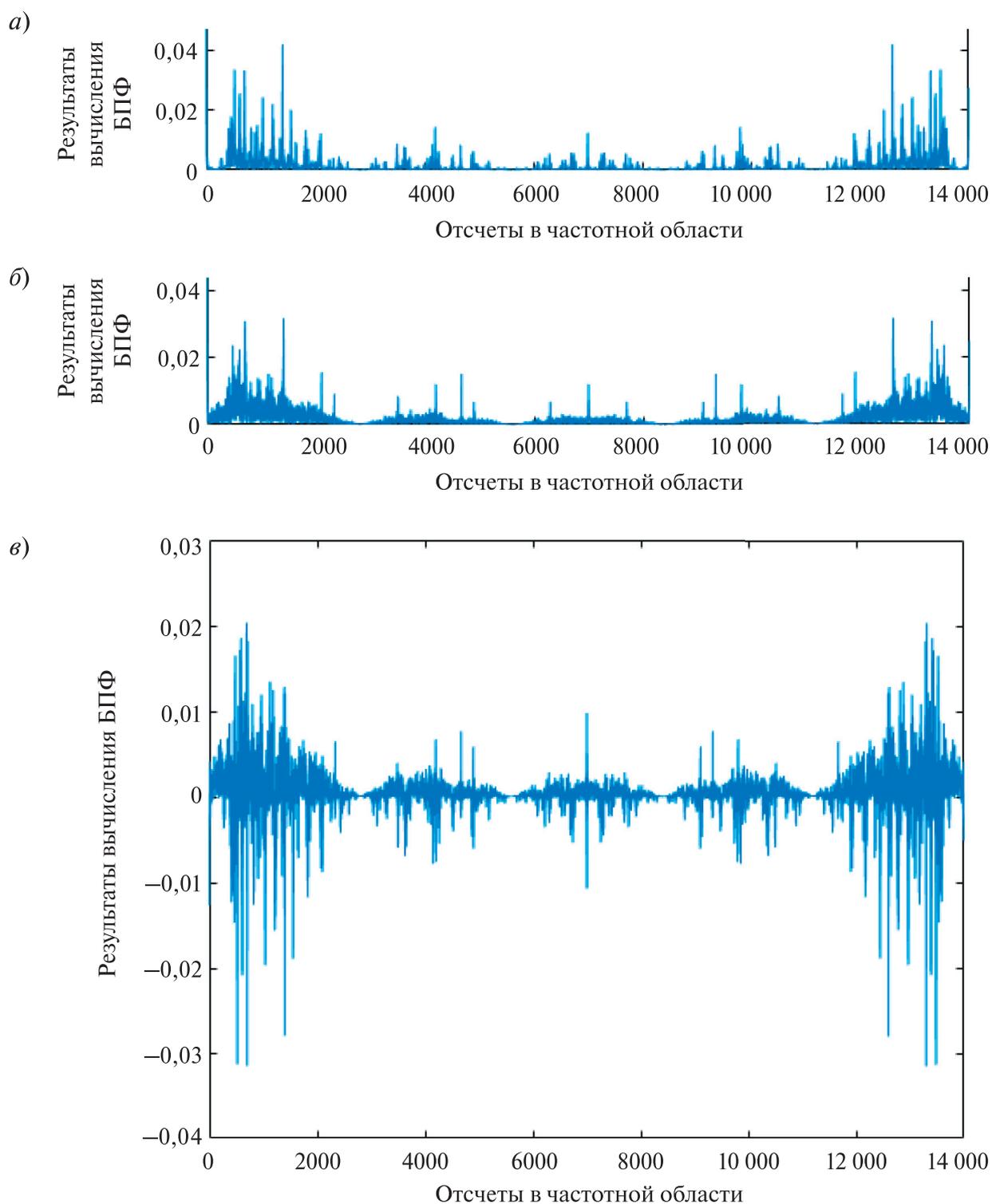


Рис. 7. Сравнение спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на рабочие дни (а — спектр «эталонного» ПГД ППМ, б — спектр реального ПГД ППМ, в — разность спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ)

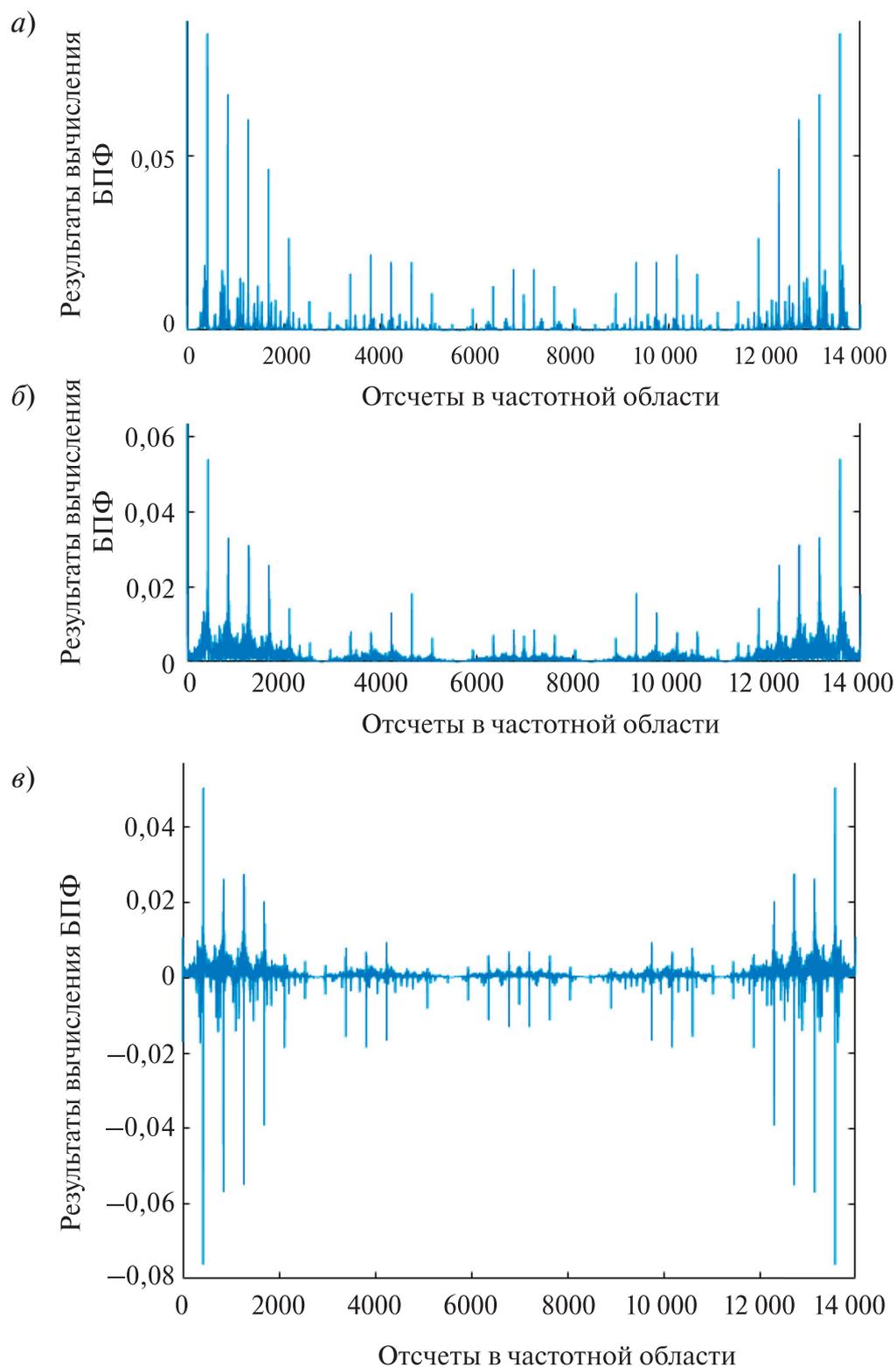


Рис. 8. Сравнение спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на выходные дни (а — спектр «эталонного» ПГД ППМ, б — спектр реального ПГД ППМ, в — разность спектров «эталонного» и реального ПГД ППМ)

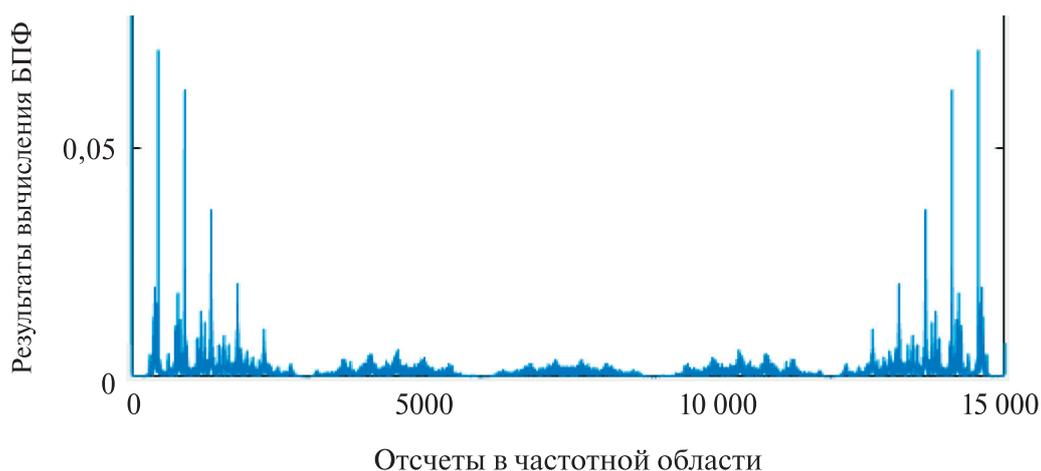


Рис. 9. Спектр «эталонного» ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на выходные дни с добавлением равномерно распределенной аддитивной помехи к заданному интервалу движения, максимальное значение которой составляет 2 % от величины планового

Малым размытием спектра ПГД отличаются станции массового ввода/снятия составов (рис. 10, в) и станции между ними (рис. 10, з), для которых, как правило, характерен максимальный пассажиропоток.

В выходные дни на всех станциях лучше соблюдается заданный интервал движения, т. е. количество вводимых/снимаемых составов влияет на соблюдение заданного интервала движения (рис. 10, д).

Различие станций по плановой длительности стоянки также отражают анализируемые спектры по величине «периодов» огибающих: 20 с — четыре «периода» на протяжении вычисляемого ДПФ для функции дискретного времени с периодом дискретизации 5 с, 25 с — пять «периодов», 30 с — шесть «периодов» (рис. 10).

Использование для анализа ПГД вейвлет-функций позволяет не только выявить факты отклонения интервалов движения от заданных размеров движения и узнать, с какими интервалами на самом деле выполняется движение, но и в сжатой форме точно указать временные моменты, в которые эти отклонения встречаются чаще всего (рис. 11).

Заключение

Рассмотренная в статье формализация описания ПГД позволяет интегрировать решение задач управления движением ППМ и оценить ее свойства с этой точки зрения. Работа содержит пример эффективного применения данной формализации для решения одной из важнейших задач, стоящих перед ЦСА-УДПМ, — автоматизации организации работы устройств системы МРЦ по подготовке пути для прохождения поездов в соответствии с ПГД.

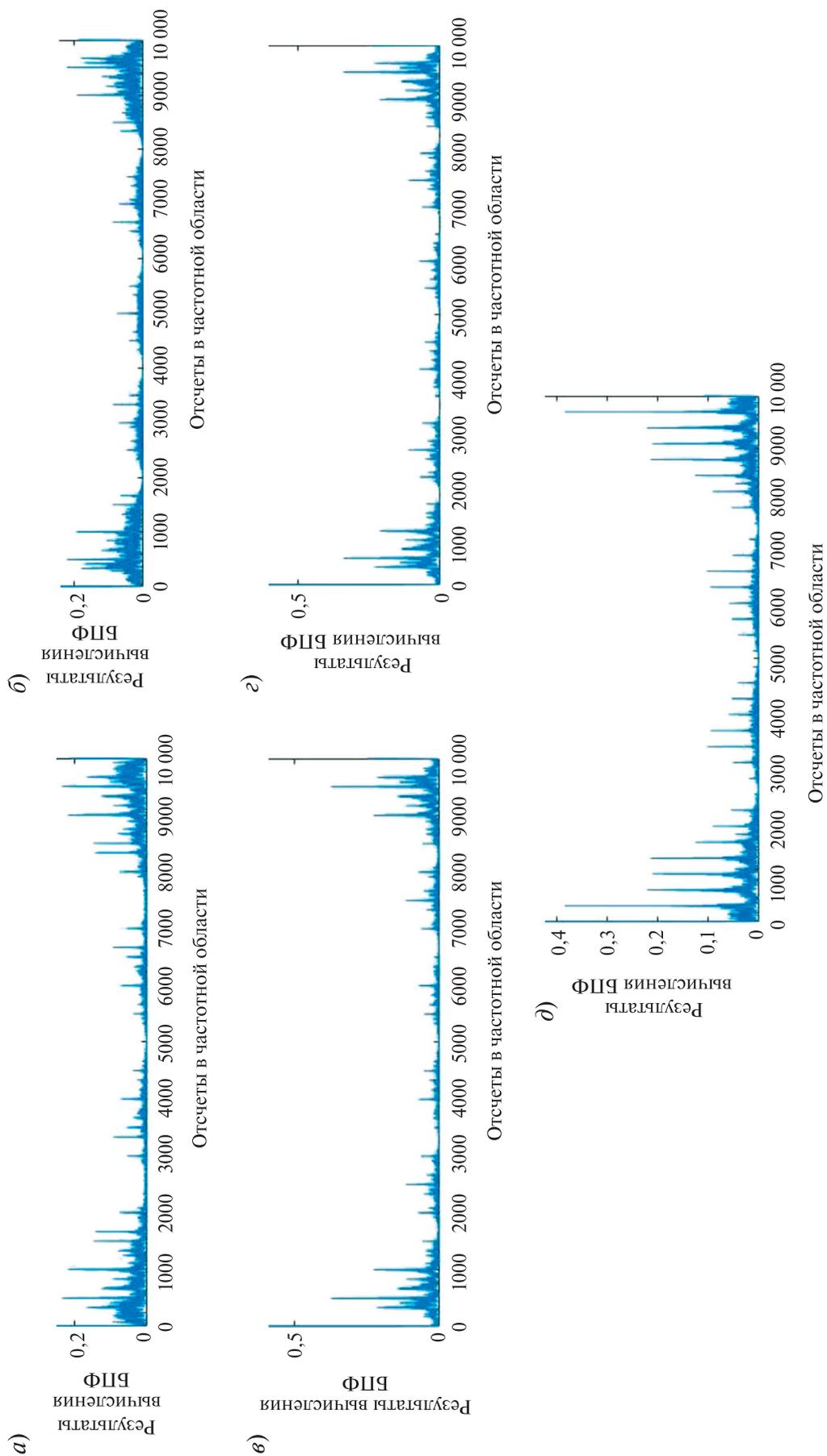


Рис. 10. Спектры фрагментов ПГД ППМ для станций Сокольнической линии Московского метрополитена на рабочие дни (а – «Красносельская», длительность стоянки 20 с; б – «Бульвар Рокоссовского», длительность стоянки 25 с; в – «Комсомольская», длительность стоянки 30 с; г – «Библиотека имени Ленина», длительность стоянки 30 с) и на выходные дни (д – «Красносельская», длительность стоянки 20 с)

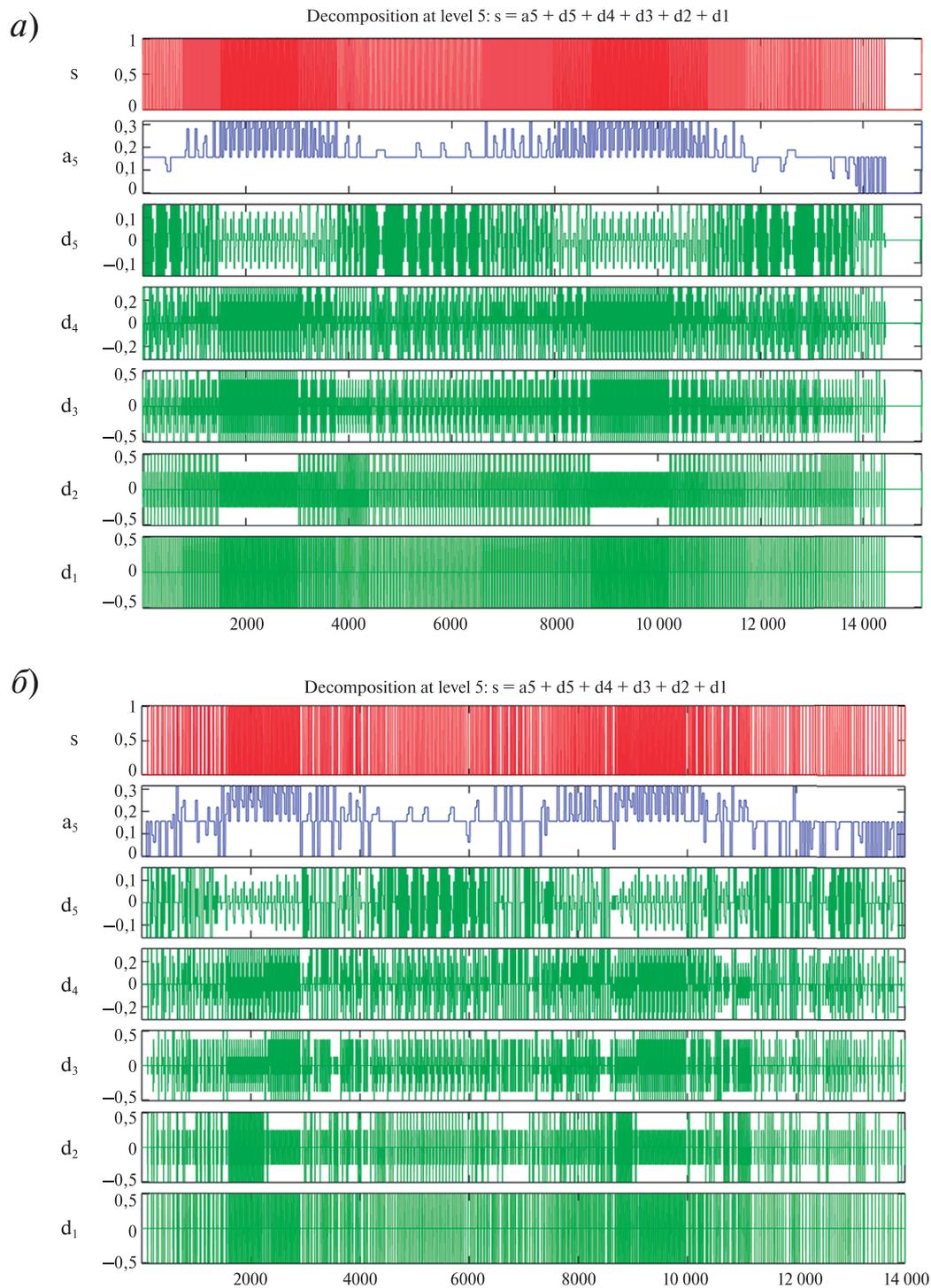


Рис. 11. Результаты применения вейвлет-преобразования к ПГД ППМ для Сокольнической линии Московского метрополитена на рабочие дни (*a* — к «эталонному» ПГД ППМ, *б* — к реальному ПГД ППМ)

Авторы вводят понятие устойчивости ПГД в «малом» и «большом». Выявлены параметры, оказывающие влияние на это свойство. Определены факторы, воздействующие на свойство системы городского рельсового транспорта, аналогичное такому свойству системы управления, как устойчивость.

Предложенный авторами способ анализа ПГД ППМ с использованием ортогональных преобразований расширяет возможности автоматизированного предварительного анализа качества результатов его автоматизированного построения, а значит:

- способствует улучшению результатов его эксплуатации;
- позволяет
 - определить интервалы времени, в которые отклонения интервалов движения от заданных размеров движения превышают пороговые значения;
 - представить соответствующую информацию в сжатой форме;
 - выполнить классификацию ПГД и объектов линии метрополитена с точки зрения равномерности движения поездов.

Научная новизна полученных результатов состоит в:

- выполнении формализации описания ПГД, которая позволяет реализовать решение задач управления движением ППМ с использованием единого информационного и понятийного пространства, способствует автоматизации их решения;
- применении понятия устойчивости к ПГД и определении ее показателей;
- расширении множества ортогональных преобразований, используемых для анализа ПГД ППМ по сравнению с ранее известным;
- вводе понятия «эталонного» ПГД с точки зрения равномерности движения поездов.

Перспективные пути дальнейших исследований связаны с:

- внедрением полученных результатов в интеллектуальные системы планирования и управления движением ППМ;
- расширением базы знаний этих систем вновь разработанными алгоритмами управления и оценки качества управления на базе введенных формализации и показателей качества;
- распространением исследований на все этапы жизненного цикла ПГД ППМ;
- развитием формального описания организации работы устройств системы МРЦ по подготовке пути для прохождения поездов в соответствии с ПГД на базе введенной формализации.

Библиографический список

1. *Солодовников В. В.* Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В. В. Солодовникова. — М.: Машиностроение, 1967. — 771 с.

2. *Бакулин А. С.* Организация движения поездов и работа станций метрополитена. / А. С. Бакулин, В. А. Пронин, Е. А. Федоров, К. И. Кудринская. — М.: Транспорт, 1981. — 230 с.
3. *Ерофеев Е. В.* Алгоритм восстановления графика движения после сбоя. / Е. В. Ерофеев, В. П. Козлов // Вестник ВНИИЖТ. — 1988. — № 1. — С. 7–14.
4. *Баранов Л. А.* Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов; Под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
5. *Баранов Л. А.* Алгоритмы для поездов метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Мир транспорта. — 2007. — № 2. — С. 104–113.
6. *Wegele, S.* Comparing the effectiveness of two real-time train rescheduling systems in the case of perturbed traffic conditions / S. Wegele, F. Corman, A. D'Ariano // Timetable Planning and Information Quality: WIT Press. — 2010. — С. 189–199.
7. *Pellegrini P.* Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions / P. Pellegrini, G. Marlière, J. Rodriguez // Transport Res B-Meth. — 2014. — № 59. — С. 58–80.
8. *Чезари Л.* Асимптотическое поведение и устойчивость решений обыкновенных дифференциальных уравнений / Л. Чезари — М.: Мир, 1964. — 478 с.
9. *Балакина Е. П.* Многофункциональные модели систем управления / Е. П. Балакина, Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. Г. Сидоренко // Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2012. — № 2. — С. 79–82.
10. *Баранов Л. А.* Метрополитен Мехико: алгоритмы движения. / Л. А. Баранов, П. Воробьев // Мир транспорта — 2012. — № 4. — С. 106–113.
11. *Rudan J.* Performance analysis of MILP based model predictive control algorithms for dynamic railway scheduling / J. Rudan, B. Kersbergen, T. van den Boom, K. Hangos // In proceedings of Control Conference (ECC). — 2013. — С. 4562–4567.
12. *Albrecht A. R.* Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search / A. R. Albrecht, D. M. Panton, D. H. Lee // Computers and Operations Research. — 2013. — № 40. — С. 703–712.
13. *Баранов Л. А.* Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Железные дороги мира. — 2002. — № 8. — С. 64–69.
14. *Логинава Л. Н.* Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения / Л. Н. Логинава // Наука и техника транспорта. — 2011. — № 1. — С. 62–65.
15. *Баранов Л. А.* Внедрение энергосберегающих технологий / Л. А. Баранов, Д. В. Гаев, А. В. Ершов, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин // Мир транспорта. — 2010. — Vol. 31. — № 3. — С. 3–8.
16. *Баранов Л. А.* Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена / Л. А. Баранов, М. А. Васильева, А. В. Ершов, В. М. Максимов, И. С. Мелешин // Вестник МИИТа. — М.: МИИТ. — 2008. — № 19. — С. 3–10.
17. *Моисеев А. А.* Энергетически оптимальное управление движением подвижного состава с дискретным регулированием силы тяги / А. А. Моисеев // Межвузовский сб. науч. тр. — М.: МИИТ, 1989. — № 811. — С. 15–19.
18. *Hu H.* A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving / H. Hu, K. Li, X. Xu // Journal of Modern Transportation. — 2013. — № 21. — С. 9–16.

19. Чжо М. А. Применение теории графов к планированию движения поездов метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // V Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование — ИСУЖТ-2016». — М.: НИИАС, 2016. — С. 131–134.
20. Тишкин Е. М. Автоматизированный расчет графиков движения поездов метрополитена / Е. М. Тишкин, А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. — 1989. — № 2. — С. 8–9.
21. Василенко М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды международной конференции «Транспорт XXI век». Варшава. 2001. — С. 24–34.
22. Christian S. Railway scheduling problems and their decomposition / S. Christian // Osnabruck, 2007. — 123 с.
23. Bruker P. Scheduling Algorithms / P. Bruker // Leipzig: Springer, 2007. — 371 с.
24. Zhao J. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow // Rail Rapid Transit. — 2009. — № 223. — С. 533–541.
25. Mišauskaitė. Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule” in: Automati-zavimas, Rototechnika/ Mišauskaitė // Electronic and electrical engineering. — 2006. — Vol. 125. — № 7(71). — С. 43–46.
26. Баранов Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко, Е. Г. Щербина // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 35–41.
27. Воробьева Л. Н. Методика учета временных ограничений скорости в графике движения поездов метрополитена / Л. Н. Воробьева, А. В. Ершов, В. Г. Сидоренко // «Соискатель» — приложение к журналу «Мир транспорта». — 2005. — № 2. — С. 86–92.
28. Сафронов А. И. Построение планового графика движения для метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир транспорта. — 2010. — № 3. — С. 98–105.
29. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 560 с.
30. Сидоренко В. Г. Синтез планового графика движения зонного типа / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. — 2010. — № 4. — С. 128–134.
31. Чжо М. А. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, В. М. Алексеев, Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский // Электротехника. — 2017. — № 12. — С. 73–76.
32. Искаков Т. А. Модель поведения различных клиентских групп в системе управления транспортногo узла / Т. А. Искаков // Наука и техника транспорта. — М., 2016. — № 3. — С. 79–89.
33. Сидоренко В. Г. Система поддержки принятия решения поездного диспетчера метрополитена / В. Г. Сидоренко // Датчики и системы управления. — 2001. — № 10. — С. 21–26.
34. Palte M. H. A. Smartfleet, how “smart” rail vehicles help improve business / M. H. A. Palte // 5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011). — 2011. — С. 1–4.
35. Noah J. G. Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes / J. G. Noah // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2014. — № 2424. — С. 58–65.

36. Forsgren M. Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making / M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg // *Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*: WIT Press. — 2012. — С. 439–450.
37. Sauder R. L. Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization / R. L. Sauder, W. M. Westerman // *Interfaces*. — 1983. — Vol. 6. — № 13. — С. 24–37.
38. Зенченко В. А. Обоснование выбора совокупности показателей для оценки трафика движения автотранспортных средств / В. А. Зенченко, А. Н. Ременцов, А. В. Павлов, А. В. Сотсков // *Грузовик*. — М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2012. — Выпуск 5 — С. 38–43.
39. Айриев Р. С. Показатели качества транспортного обслуживания населения / Р. С. Айриев, М. А. Кудряшов // *Мир транспорта*. — 2018. — № 4. — С. 140–145.
40. Калиев Ж. Ж., Мелешин И. С., Шабданов Д. Т. Модули и алгоритмы автоведения / Ж. Ж. Калиев, И. С. Мелешин, Д. Т. Шабданов // *Мир транспорта*. — 2010. — № 3. — С. 138–144.

T. A. Iskhakov

A. I. Safronov

V. G. Sidorenko

M. A. Chzho

*Department of "Information Management and Security",
Russian University of Transport, Moscow*

APPROACHES TO QUALITY ASSESSMENT OF SUBWAY TRAFFIC PLANNING AND MANAGEMENT

Quality assessment methods for subway traffic planning and management were analyzed as well as the connection of the above-mentioned with lifecycle phases of the projected traffic schedule. Versions for description of subway traffic planning results were considered, the connection of choosing one of them with the content of current control tasks was demonstrated. The parameters of the projected traffic schedule were determined influencing its stability in the "big" and "small" as well as the control quality in accordance with performance criteria and control objectives. The effect analysis of applying orthogonal transformations to different models of the projected traffic schedule was conducted. The quality assessment with the use of orthogonal transformations proposed by the authors showed its efficiency in evaluation of traffic steadiness as well as compliance with the fixed paired movement. The given method of presenting data may be used as an intermediate option of the extended and "complicated from the viewpoint of a one-sided survey" method for traditional data presentation of subway traffic planning results on the one hand and extremely concise average description by means of operating measuring instruments and integrated performance indices on the other.

subway, stability, planned traffic schedule, discrete Fourier transform, spectrum

References

1. Solodovnikov V. V. (1967) *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya*. Kniga 1. Matematicheskoye opisaniye, analiz ustoichivosty i kachestva system avtomaticheskogo regulirovaniya [Engineering cybernetics. Automatic control

- theory. Volume 1. Mathematical formulation, quality and stability analysis of automatic control systems]. Edited by V. V. Solodovnikov. Moscow, Mashinostroeniye [Mechanical engineering] Publ., 771 p. (In Russian)
2. *Bakulin A. S., Pronin V. A., Fedorov E. A. & Kudrinskaya K. I.* (1981) Organizatsiya dvizheniya poezdov i rabota stantsiy metropolitena [Operation of trains and activity of subway stations]. Moscow, Transport Publ., 230 p. (In Russian)
 3. *Erofeyev E. V. & Kozlov V. P.* (1998) Algoritm vosstanovleniya grafika dvizheniya posle sboya [Schedule recovery algorithm after failure]. *Vestnik VNIIZhT [Proceedings of All-Russian Research Institute of Railway Transport]*, no. 1, pp. 7–14. (In Russian)
 4. *Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeyev E. V. & Maksimov V. M.* (1990) Mikoroprotsessorniye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Microprocessor-based systems of automatic operation of the electric motive power]. Edited by L. A. Baranov. Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)
 5. *Baranov L. A., Balakina E. P. & Vorobyeva L. N.* (2007) Algoritmy dlya poezdov metropolitena [Algorithms for subway trains]. *Mir transporta [The world of transport]*, no. 2, pp. 104–113. (In Russian)
 6. *Wegele S., Corman F. & D'Ariano A.* (2010) Comparing the effectiveness of two real-time train rescheduling systems in the case of perturbed traffic conditions. *Timetable Planning and Information Quality: WIT Press*, pp. 189–199.
 7. *Pellegrini P., Marlière G. & Rodriguez J.* (2014) Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions. *Transport Res B-Meth*, no. 59, pp. 58–80.
 8. *Chezari L.* (1964) Asimptoticheskoye povedeniye i ustoichivost resheniy obyknovennykh differentsialnykh uravneniy [Asymptotical behavior and solution stability of ordinary differential equations]. Moscow, Mir [World] Publ., 478 p. (In Russian)
 9. *Balakina E. P., Baranov L. A., Erofeyev E. V. & Sidorenko V. G.* (2012) Mnogofunktionalniye modely system upravleniya [Multifunctional models of operation systems]. *Problemy poligrafii i izdatelskogo dela [Problems of polygraphy and publishing]*, no. 2, pp. 79–82. (In Russian)
 10. *Baranov L. A. & Vorobyev P.* (2012) Metropolitен Mekhiko: algoritmy dvizheniya [The subway of Mexico City: algorithms of traffic]. *Mir transporta [The world of transport]*, no. 4, pp. 106–113. (In Russian)
 11. *Rudan J., Kersbergen B., T. van den Boom & Hangos K.* (2013) Performance analysis of MILP based model predictive control algorithms for dynamic railway scheduling. *In proceedings of Control Conference (ECC)*, pp. 4562–4567.
 12. *Albrecht A. R., Panton D. M. & Lee D. H.* Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search. *Computers and Operations Research*, no. 40, pp. 703–712.
 13. *Baranov L. A. & Sidorenko V. G.* (2002) Trenazher poezdnykh dispetcherov liniy Moskovskogo metropolitena [Training simulator for traffic controllers of Moscow tube lines]. *Zheleznnye dorogi mira [Railroads of the world]*, no. 8, pp. 64–69. (In Russian)
 14. *Loginova L. N.* (2011) Rol sistemy avtomatizirovannoy proverky znaniy poezdnykh dispetcherov linii metropolitena v povyshenii kachestva obucheniya [The role of automated knowledge assessment system for traffic controllers of subway lines in improvement of education quality]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport]*, no. 1, pp. 62–65. (In Russian)
 15. *Baranov L. A., Gaev D. V., Ershov A. V., Grechishnikov V. A. & Shevlyugin M. V.* (2010) Vnedreniye energosberegayushchikh tekhnologiy [Adoption of energy-efficient technologies]. *Mir transporta [The world of transport]*, vol. 31, no. 3, pp. 3–8. (In Russian)

16. Baranov L. A., Vasilieva M. A., Ershov A. V., Maksimov V. M. & Meleshin I. S. (2008) Avtomatizirovannaya sistema vybora energooptimalnykh rezhimov upravleniya dvizheniyem poezda metropolitena [Automated systems of power-optimum mode selection for traffic operation of subway trains]. *Vestnik MIITa* [Proceedings of the Russian University of Transport]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., no. 19, pp. 3–10. (In Russian)
17. Moiseev A. A. (1989) Energetichesky optimalnoye upravleniye dvizheniyem podvizhnogo sostava s diskretnym regulirovaniyem sily tyagy [Power optimum operation control of the rolling stock with discrete adjustment of traction effort]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Interuniversity collection of research papers]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., no. 811, pp. 15–19. (In Russian)
18. Hu H., Li K. & Xu X. (2013) A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving. *Journal of Modern Transportation*, no. 21, pp. 9–16.
19. Chzho M. A. & Sidorenko V. G. (2016) Primeneniye teorii grafov k planirovaniyu dvizheniya poezdov metropolitena. V Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Intellektualniye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Kompyuternoye i matematicheskoye modelirovaniye — ISUZhT-2016” [Application of the theory of graphs for subway traffic planning. The 5th International scientific and technical conference “Intelligent railway operation systems. Computer and mathematical simulation — ISUZhT-2016”]. Moscow, NIIAS [Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation of the Ministry of Railways of the Russian Federation] Publ., pp. 131–134. (In Russian)
20. Tishkin E. M. & Feofilov A. N. (1989) Avtomatizirovanniy raschet grafikov dvizheniya poezdov metropolitena [Computerized analysis of the subway train schedule]. *Vestnik VNIIZhT* [Proceedings of All-Russian Research Institute of Railway Transport], no. 2, pp. 8–9. (In Russian)
21. Vasilenko M. N., Degtyarev D. P. & Maksimenko O. A. (2001) Avtomaticheskoye postroeniye grafikov dvizheniya poezdov na metropolitene [Computerized graph plotting for subway train schedule]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii “Transport XXI vek”* [Proceedings of the International Conference “Transport the 21st century”]. Warsaw, pp. 24–34. (In Russian)
22. Christian S. (2007) Railway scheduling problems and their decomposition. Osnabruck, 123 p.
23. Bruker P. Scheduling Algorithms. Leipzig, Springer Publ., 2007, 371 p.
24. Zhao J., Chan A. H. C. & Burrow M. P. N. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components. *Rail Rapid Transit*, 2009, no. 223, pp. 533–541.
25. Mišauskaitė (2006). Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule” in: Automatizavimas, Rototechnika. *Electronic and electrical engineering*, vol. 125, no. 7(71), pp. 43–46.
26. Baranov L. A., Bestemyanov P. F., Sidorenko V. G. & Shcherbina E. G. (2013) Metod otsenky izmeneniya elektromagnitnoy obstanovki v mestakh funktsionirovaniya sistem intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Evaluation method for electromagnetic environment change in areas of collision avoidance systems functioning]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], no. 3, pp. 35–41. (In Russian)

27. Vorobyeva L. N., Ershov A. V. & Sidorenko V. G. (2005) Metodika ucheta vremennykh ogranicheniy skorosty v grafike dvizheniya poezdov metropolitena. [Method of accounting temporal speed limitations in subway train traffic schedule]. "Soiskatel" — prilozheniya k zhurnalu "Mir transporta" ["Applicant" — supplement for "The world of transport"], no. 2, pp. 86–92. (In Russian)
28. Safronov A. I. & Sidorenko V. G. (2010) Postroeniye planovogo grafika dvizheniya metropolitena [Scheduling of the subway train traffic]. *Mir transporta* [*The world of transport*], no. 3, pp. 98–105. (In Russian)
29. Smolentsev N. K. (2019) Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB [Foundations of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB]. Moscow, DMK Press, 560 p. (In Russian)
30. Sidorenko V. G. & Novikova M. V. (2010) Sintez planovogo grafika dvizheniya zonnogo tipa [Design of the projected regional-type traffic schedule]. *Mir transporta* [*The world of transport*], no. 4, pp. 128–134. (In Russian)
31. Chzho M. A., Sidorenko V. G., Alekseev V. M., Rozenberg E. N. & Umanskiy V. I. (2017) Planirovaniye obsluzhivaniya elektropodvizhnogo sostava v usloviyakh ogranichennykh resursov [The locomotive maintenance planning under the conditions of limited resources]. *Elektrotehnika* [*Electrical engineering*], no. 12, pp. 73–76. (In Russian)
32. Iskhakov T. A. (2016) Model povedeniya razlichnykh klientskikh grupp v sisteme upravleniya transportnogo uzla [A behavior model of diverse client groups in the transport nodal point control system]. *Nauka i tekhnika transporta* [*Science and technology of transport*]. Moscow, no. 3, pp. 79–89. (In Russian)
33. Sidorenko V. G. (2001) Sistema podderzhky prinyatiya resheniya poezdnoy dispetchera metropolitena [Decision support system for the subway traffic controller]. *Datchiki i sistemy upravleniya* [*Sensing elements and control systems*], no. 10, pp. 21–26. (In Russian)
34. Palte M. H. A. (2011) Smartfleet, how "smart" rail vehicles help improve business. *5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011)*, pp. 1–4.
35. Noah J. G. (2014) Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2424, pp. 58–65.
36. Forsgren M., Aronsson M., Gestrelus S. & Dahlberg H. (2012) Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making. *Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*: WIT Press, pp. 439–450.
37. Sauder R. L., Westerman W. M. (1983) Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization. *Interfaces*, vol. 6, no. 13, pp. 24–37.
38. Zenchenko V. A., Rementsov A. N., Pavlov A. V. & Sotskov A. V. (2012) Obosnovaniye vybora sovokupnosti pokazateley dlya otsenky trafika dvizheniya avtotransportnykh sredstv [Rationale for choosing a package of indices for vehicle traffic evaluation]. *Gruzovik [Van]*. Moscow, Mashinostroyeniye [Mechanical engineering] Publ., iss. 5, pp. 38–43. (In Russian)
39. Airiev R. S. & Kudryashov M. A. (2018) Pokazately kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya [Quality indices for public transport services]. *Mir transporta* [*The world of transport*], no. 4, pp. 140–145. (In Russian)
40. Kaliev Zh. Zh., Meleshin I. S. & Shabdanov D. T. (2010) Moduly i algoritmy avtovedeniya [Modules and algorithms of automatic train operation]. *Mir transporta* [*The world of transport*], no. 3, pp. 138–144. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Л. А. Барановым
Поступила в редакцию 17.09.2019, принята к публикации 21.11.2019*

ИСКАКОВ Тимур Анвярович — аспирант кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта;

e-mail: tiskakov@yandex.ru

САФРОНОВ Антон Игоревич — кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта;

e-mail: safronov-ai@mail.ru

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна — доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта;

e-mail: valenfalk@mail.ru

ЧЖО Мин Аунг — кандидат технических наук

e-mail: kyawminaung52@gmail.com

© Искаков Т. А., Сафронов А. И., Сидоренко В. Г., Чжо М. А., 2020