

Метрополитен Мехико: алгоритмы движения



Леонид БАРАНОВ
Leonid A. BARANOV

Павел ВОРОБЬЕВ
Pavel Yu. VOROBIEV



Баранов Леонид Аврамович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Воробьев Павел Юрьевич — магистр технических наук, аспирант кафедры «Управление и информатика в технических системах» МИИТ.

Графико-интервальный алгоритм централизованного автоматизированного управления движением поездов метрополитена, учитывающий зависимость регулирующих ограничений от состояния системы. При этом используется адаптивная модель времени стоянки, в которой отражена предыстория отклонений от графика при отправлении идущих впереди поездов со станций маршрута. Алгоритм рассматривается применительно к метрополитену Мехико и его особенностям.

Ключевые слова: метрополитен, Мехико, движение поездов, АСУ, алгоритмы управления.

Метрополитен г. Мехико является одним из самых загруженных в мире. Краткая сводка его характеристик в сравнении с московским метрополитеном приведена в таблице 1. Причем в числе самых востребованных подземных трасс мексиканской столицы фигурирует линия № 3, которая и выбрана нами для моделирования.

1.

Среди особенностей метрополитена Мехико, наиболее важных с точки зрения автоматизированного управления движением поездов, можно выделить прежде всего три.

Первая — использование на большинстве линий подвижного состава с резиновыми колесами, а также тот факт, что значительное количество перегонов расположено под открытым небом (рис. 1). Такая комбинация приводит к дополнительным скоростным ограничениям на открытых участках во время дождя.

Вторая особенность — малое количество рельсовых цепей на перегонах по сравнению с Москвой. Относительно грубое квантование пути делает необходимым

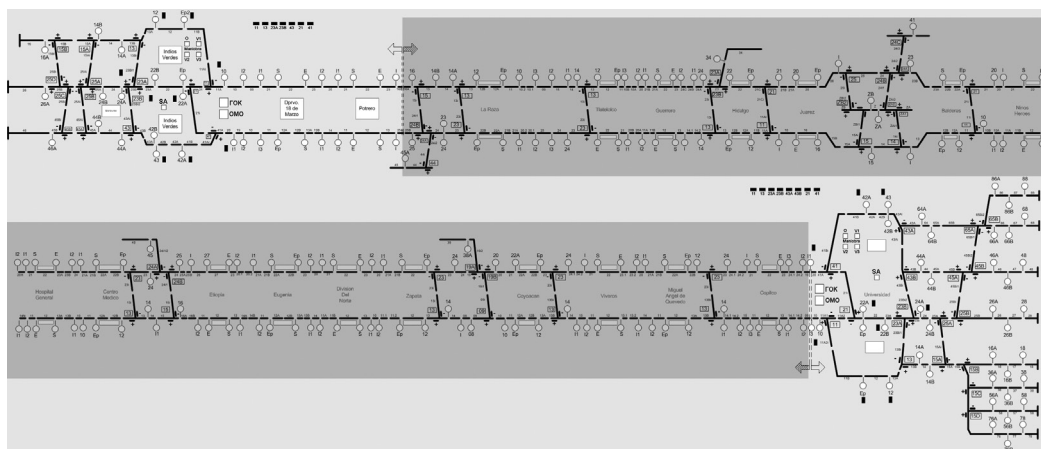


Рис. 1. Схематическое изображение диспетчерского табло 3-й линии метрополитена г. Мехико.
 Темным фоном обозначен подземный участок.

Таблица 1

Краткое сравнение характеристик метрополитенов Москвы и Мехико [6,7]

Характеристики	STC Mexico	MM
Количество действующих линий	11	12
Количество станций (всего [подземных + наземных + надземных]/пересадочных)	175 [106+53+16]/41	177 [162+9+6]/62
Протяженность линий (пассажирских/плюс обслуживания)	201/365	292/400
Пассажиропотоки в сутки (максимальный/средний)	5 млн/4,4 млн	9,5 млн/7 млн
Стоимость проезда (в долларах США)	0,2	0,9
Максимальная парность поездов в час	33	41
Энергопотребление (МВт-ч/сутки)	~ 2500	~ 4500
Стоимость кВт-ч (в долларах США)	0,1437	0,0646 ¹
«Счет за свет» (долларов/сутки)	360 000	290 000
Год создания и запуска	1969	1935
Доля пассажироперевозок по городу	13%	56%

более точное управление временами стоянки и хода поезда для выполнения планового графика движения.

Третье отличие – использование трехплатформенных конечных станций. Данная особенность позволяет реализовывать четыре различные схемы оборота поездов, из которых две могут производиться одновременно (рис. 2).

Отдельно стоит отметить высокую стоимость электроэнергии в Мексике, что делает применение автоматизированного управления движением поездов весьма актуальным и экономически выгодным.

Автоматизированное управление движением поездов метрополитена обеспечивает повышение использования пропускной способности и увеличение провозной способности линии за счет более точного

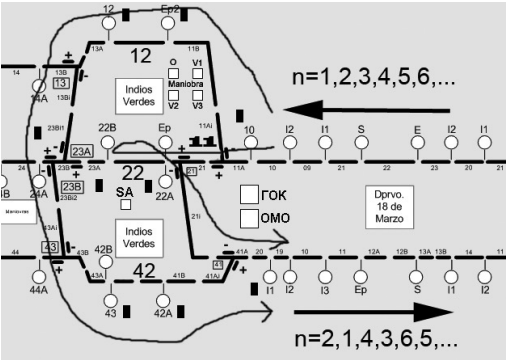


Рис. 2. Трехплатформенная конечная станция, стрелками показана схема одновременного (параллельного) оборота двух поездов.

выполнения графика, улучшение показателей безопасности движения за счет уменьшения вероятности опасного сбли-



жения поездов, снижение затрат энергии на тягу поезда за счет выбора энергооптимальных режимов управления поездом и оптимального, по критерию минимума энергозатрат, распределения времени хода по линии на времена хода по перегонам.

Система автоматизированного управления строится как двухуровневая. Верхний уровень определяет рассогласование между плановым (ПГД) и исполненным графиком движения (ИГД). При компенсируемых возмущениях здесь формируется управление (длительность стоянки и требуемое время хода) для каждого поезда на линии. В случае некомпенсируемых возмущений рассчитывается новый ПГД и осуществляется управление в соответствии с этим графиком. Нижний уровень реализует управление, задаваемое верхним уровнем.

II.

Известны графические, интервальные и графико-интервальные алгоритмы управления движением поездов на линии метрополитена [1]. В графических алгоритмах определяется рассогласование по астрономическому времени между плановым и исполненным графиком движения, управление парирует эти отклонения. Полный графический алгоритм компенсирует отклонения по времени прибытия поезда путем изменения длительности стоянки на станции, а отклонения времени отправления — изменением времени хода по перегону. Например, в случае опоздания:

$$\Delta T_{lj}[n] = t_{lj}^{\phi}[n] - t_{lj}^r[n] > 0 \quad (1)$$

где $t_{lj}^{\phi}[n]$ — фактическое время прибытия n -го поезда на j -ю станцию;

$t_{lj}^r[n]$ — графическое время прибытия n -го поезда на j -ю станцию;

$\Delta T_{lj}[n]$ — отклонение времени по прибытию n -го поезда на j -ю станцию.

Поезд отправляется по графику $t_{oj}^y[n] = t_{oj}^r[n]$, то есть время отправления, рассчитанное управлением, равно плановому (графическому) при соблюдении ограничений по минимальному времени стоянки и минимальному интервалу по отправлению

$$t_{oj}^y[n] - t_{lj}^{\phi}[n-1] \geq T_c^{\min}; \quad (2)$$

$$t_{oj}^y[n] - t_{oj}^r[n-1] \geq T_{no}^{\min} \quad (3)$$

по условиям системы безопасности движения.

Если условие (2) не выполняется, то поезд отправляется после соблюдения минимального времени стоянки:

$$t_{oj}^y[n] = t_{lj}^{\phi}[n] + T_c^{\min}. \quad (4)$$

Если не выполняется условие (3), то поезд отправляется после истечения минимального интервала с момента отправления идущего впереди поезда:

$$t_{oj}^y[n] = t_{oj}^r[n-1] + T_{no}^{\min}. \quad (5)$$

Отклонение от планового времени стоянки компенсируется изменением времени хода по лежащему впереди перегону

$$\Delta T_{xj}^y[n] = t_{oj}^y[n] - t_{oj}^r[n] \quad (6)$$

при соблюдении ограничения на минимальное время хода по перегону

$$T_{xj}^r[n] + \Delta T_{xj}^y[n] \geq T_j^{\min}, \quad (7)$$

иначе выполняется минимальное время хода.

Другие разновидности алгоритма используют соответствующие ресурсы с теми же ограничениями. Однако если имеющегося ресурса недостаточно для возврата в график, возмущения считаются некомпенсируемыми. Одним из эффективных способов управления в этом случае становится переход на интервальный алгоритм.

В интервальном алгоритме с первоначальным использованием ресурса длительности стоянки ее изменение производится для компенсации отклонения интервала по прибытию $\Delta T_{lj}^y[n]$, а изменение времени хода — для компенсации отклонения интервала по отправлению $\Delta T_{oj}^y[n]$. В общем виде (8, 9), где L_1, L_2 — операторы; m, l — число идущих впереди поездов, учитываемых при формировании управления.

Например, при учете одного поезда и соблюдении условий удовлетворения минимального времени хода и минимального интервала по отправлению (выражения 2 и 3) управление рассчитывается как $t_{oj}^y[n] = t_{oj}^r[n-1] + T_{cj}^r[n] + \Delta T_{cj}^y[n]$.

$$\text{При несоблюдении условий (2) и (3) расчет производится по наиболее сильному ограничению из (4) и (5). Время хода формируется, согласно (9), для } l=1 \\ \Delta T_{xj}^y[n] = -\Delta T_{noj}^y[n] + k_1 \Delta T_{xj}^y[n-1], 0 < k_1 < 1 \quad (11)$$

при соблюдении ограничения на минимальное время хода по перегону (7), иначе

$$\Delta T_G^y[n] = L_1 \{ \Delta T_{инт}[n], \Delta T_G^y[n-1], \Delta T_G^y[n-2], \dots, \Delta T_G^y[n-m] \}; \quad (8)$$

$$\Delta T_{хј}^y[n] = L_2 \{ \Delta T_{инт}[n], \Delta T_{хј}^y[n-1], \Delta T_{хј}^y[n-2], \dots, \Delta T_{хј}^y[n-l] \}; \quad (9)$$

реализуется минимальное время хода. Другие разновидности интервального алгоритма используют соответствующие ресурсы с теми же ограничениями. Графиково-интервальный алгоритм объединяет в себе приведенные варианты. Если отклонения от планового графика движения не превышают некоторой допустимой величины, реализуется графиковый алгоритм, иначе — интервальный.

III.

В нашем исследовании представлен графиково-интервальный алгоритм, отличающийся от известных учетом зависимости ограничения на управление от состояния системы и введением новой модели стоянки [2], в которой осуществляется прогноз допустимого отклонения от плановой стоянки для поезда, прибывающего на станцию. Алгоритм формирует управление, используя данные об отклонениях графиковых и фактических времен прибытия и отправления поездов, а также интервалов по прибытию и отправлению. Имеются следующие ограничения на управление:

- минимальный интервал по отправлению $T_{инт}^{min}_j[n]$;
- минимальное время хода по перегону $T_{х}^{min}_j$, которое определяется характеристиками пути (планом, профилем, допустимыми скоростями) и подвижного состава;
- минимальное время стоянки $T_{с}^{min}_j$, которое связано с необходимым временем высадки и посадки пассажиров на станции.

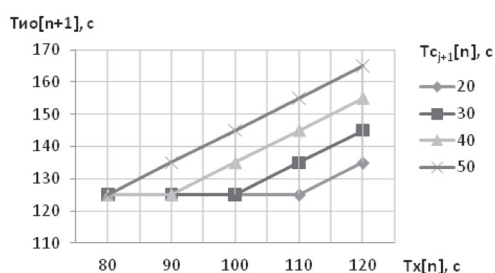


Рис. 3. Первая временная характеристика промежуточного перегона Potrero – Deportivo 18 de Marzo.

Если минимальное время хода и минимальная длительность стоянки постоянны, то минимальный интервал попутного следования при заданной системе интервального регулирования (обеспечения безопасности) является функцией времени хода идущего впереди поезда и длительности его стоянки на последующей станции:

$$T_{инт}^{min}_j[n] = f\{T_{хј}[n-1], T_{сj+1}[n-1]\}, \quad (12)$$

где $T_{хј}[n-1]$ — время хода впередиидущего поезда, $T_{сj+1}[n-1]$ — длительность стоянки идущего впереди поезда на следующей станции.

Методика получения зависимости (12), называемой первой временной характеристикой перегона, изложена в [3]. Примеры зависимостей, полученных с помощью имитационного моделирования линии № 3 метрополитена Мехико, показаны для промежуточного перегона — между промежуточными станциями (рис. 3) и конечного перегона — между промежуточной и конечной станцией в режиме последовательного оборота поездов (рис. 4).

Для конечного перегона в режиме параллельного оборота, использующего особенность трехплатформной конечной станции, первая временная характеристика рассчитывается несколько иначе. Для примера используем конечный перегон Deportivo 18 de Marzo — Indios Verdes (рис. 2). Обозначим поезда, отправляющиеся со станции Deportivo 18 de Marzo в сторону конечной станции Indios Verdes, как $n=1, 2, 3, 5, 6$ и т.д. Тогда в режиме парал-

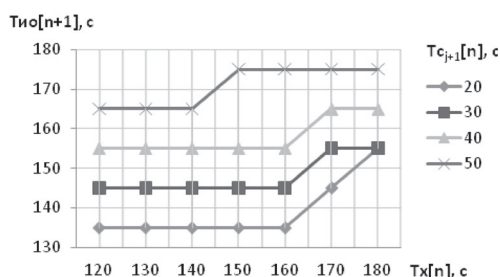


Рис. 4. Первая временная характеристика конечного перегона Deportivo 18 de Marzo – Indios Verdes в режиме последовательного оборота.



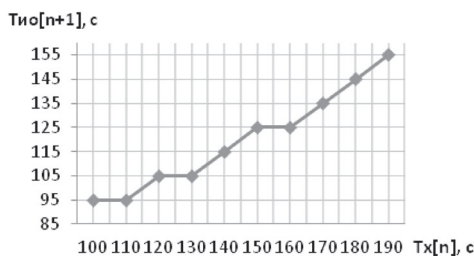


Рис. 5. Первая временная характеристика конечного перегона Potrero – Deportivo 18 de Marzo – Indios Verdes в режиме параллельного оборота.

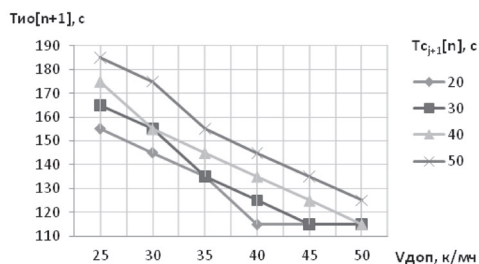


Рис. 6. Вторая временная характеристика перегона Potrero – Deportivo 18 de Marzo.

лельного оборота первый поезд ($n=1$) прибывает на платформу Indios Verdes с рельсовой цепью «12»; переключается положение стрелки «11», что позволяет следующему поезду следовать на зеленый сигнал светофора «10»; второй поезд ($n=2$) прибывает уже на параллельно расположенную платформу Indios Verdes с рельсовой цепью «22».

Пока первый поезд совершает длинный оборот с платформы с рельсовой цепью «12» на платформу с рельсовой цепью «42», второй поезд делает короткий оборот со сменой головы на платформе с рельсовой цепью «22», первым отправляясь в сторону станции Deportivo 18 de Marzo. Далее нечетные поезда ($n=3, 5, \dots$) продолжают прибывать на платформу Indios Verdes с рельсовой цепью «12», в то время как четные поезда ($n=4, 6, \dots$) – соответственно на рельсовую цепь «22». Если последовательность поездов, отправляющихся со станции Deportivo 18 de Marzo в сторону конечной станции Indios Verdes, $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$, то последовательность поездов, отправляющихся после параллельного оборота со станции Indios Verdes в сторону станции Deportivo 18 de Marzo, преобразуется соответственно в $n=2, 1, 4, 3, 6, 5$ и т. д. Нетрудно заметить, что после очередного прохождения станции с параллельным оборотом последовательность восстанавливается.

В общем виде переключение стрелки, контролирующей путевое развитие, для поезда $[n]$ происходит по прибытии поезда $[n-1]$ на любую из платформ (при этом времена хода по конечному перегону независимо от выбора платформы совпадают). После переключения стрелки с точки зрения сигналов светофоров поезд $[n]$ следует

уже не за поездом $[n-1]$, а за $[n-2]$, прибывшим ранее на соответствующую параллельную платформу. Это значит, что интервал по отправлению поездов с предыдущей станции зависит не от времени стоянки идущего впереди поезда, а от времени стоянки поезда, на один его опережающего. Однако для того чтобы стоянка поезда $T_{сж+1}[n-2]$ имела влияние на отправление поезда $[n]$, нужно, чтобы ее длительность превысила некоторую допустимую величину T_d . В случае превышения T_d трехплатформную станцию следует рассматривать как двухплатформную, тогда первая временная характеристика рассчитывается согласно выражению (12). При меньшей длительности стоянки наличие параллельной платформы позволяет не учитывать зависимость интервала по отправлению $T_{ио}^{min}_j[n]$ от времени стоянки, и первая временная характеристика есть функция времени хода $T_{xj}[n-1]$:

$$T_{ио}^{min}_j[n] = f\{T_{xj}[n-1]\}, \text{ при } T_{сж+1}[n-2] < T_d \quad (12.1)$$

Пример первой временной характеристики для конечного перегона в режиме параллельного оборота, использующего особенность трехплатформной конечной станции, приведен на рис. 5.

IV.

Приведенная выше зависимость не учитывает дополнительных скоростных ограничений и позволяет эффективный выбор интервала по отправлению в нормальных условиях эксплуатации. Однако в таких случаях, как ремонт путевых участков во время дождя на открытых перегонах, центральный пост управления вводит дополнительные скоростные ограничения. Для того чтобы их учесть при выборе ин-

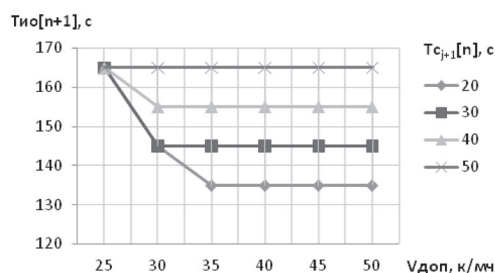


Рис. 7. Вторая временная характеристика перегона Deportivo 18 de Marzo – Indios Verdes. Конечная станция в режиме последовательного оборота.

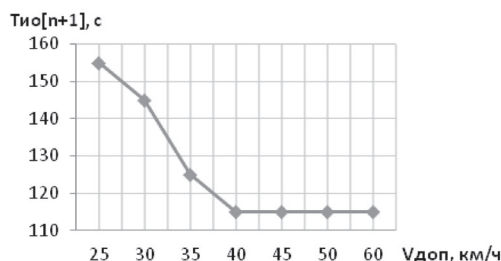


Рис. 8. Вторая временная характеристика перегона Deportivo 18 de Marzo – Indios Verdes. Конечная станция в режиме параллельного оборота.

тервала по отправлению поездов, рассчитывается вторая временная характеристика перегона [3], определяющая интервал попутного следования как функцию дополнительного ограничения скорости и времени стоянки идущего впереди поезда на предстоящей станции:

$$T_{ио}^{min}_j[n] = f\{V_{доп}, T_{сj+1}[n-1]\} \quad (13)$$

где $T_{ио}^{min}_j[n]$ — минимальный интервал попутного следования,

$V_{доп}$ — дополнительное ограничение скорости на перегоне,

$T_{сj+1}[n-1]$ — длительность стоянки идущего впереди поезда на находящейся впереди станции.

Примеры зависимостей показаны для «обычного перегона» (рис. 6), а также «конечного перегона» в режимах последовательного (рис. 7) и параллельного оборотов (рис. 8).

Режим последовательного оборота на конечном перегоне устанавливает максимальное на линии значение минимального интервала по отправлению поездов, он становится минимальным интервалом попутного следования по всей линии. С другой стороны, режим параллельного оборота позволяет ускоренное отправление поездов с предпоследней промежуточной станции, снижая значение минимального интервала по отправлению.

На основе данных, полученных при расчете первой и второй временных характеристик, верхний уровень управления выбирает интервал по отправлению поезда со станции. Минимальное время хода n -го поезда ($T_{хj}^{миндоп}[n]$), при котором он идет по зеленым сигналам светофора, зависит от времени хода предыдущего поезда ($T_{хj}[n-1]$), длительности его стоянки на находящейся впереди станции ($T_{сj+1}[n-1]$)

и интервала по отправлению n -го поезда на данный перегон ($T_{иоj}[n]$). Эта зависимость называется регулировочной характеристикой перегона [3]:

$$T_{хj}^{миндоп}[n] = f\{T_{иоj}[n], T_{хj}[n-1], T_{сj+1}[n-1]\} \quad (14)$$

Примеры регулировочных характеристик показаны для промежуточного перегона (рис. 9), а также конечного перегона в режимах последовательного (рис. 10) и параллельного оборотов (рис. 11).

V.

Определим «ресурс нагона» линии как разность между временем хода по плановому графику движения и минимальным временем хода. В частности, для 20 перегонов линии № 3 ресурс нагона составляет 200 секунд в часы «пик» и 300 — в часы «не пик» (около 4 и 6% от времени полного оборота по линии).

Аналогично «ресурс длительностей стоянок» определяется как разность сумм плановых стоянок по линии и минимально допустимых. Так, для линии № 3 ресурс длительностей стоянок составляет 100 и 300 секунд в часы «пик» и «не пик» (около 2% и 6% от полного времени оборота по линии).

Эти данные свидетельствуют о том, что зависимость ограничения на управление от состояния системы существенны. Для улучшения использования ресурсов линии предлагается применять адаптивную модель длительности стоянки поезда на станции [2]. Для случаев, когда ресурс длительности стоянки уже не позволяет обеспечить необходимое качество управления при заданном объеме движения, рекомендуется радикальный подход, изложенный в [5].





Рис. 9. Регулировочная характеристика перегона Potrero – Deportivo 18 de Marzo, (слева ТИОj [n] = 105 с, справа ТИОj [n] = 115 с).

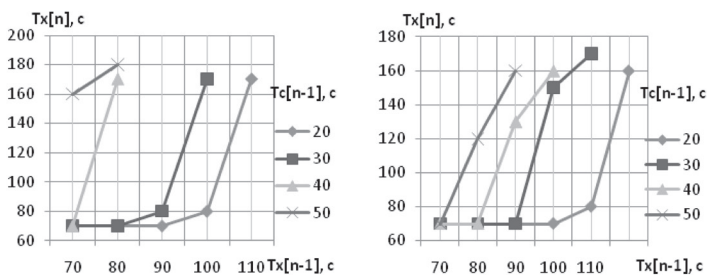
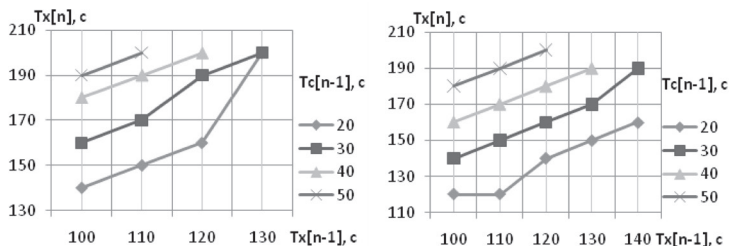


Рис. 10. Регулировочная характеристика перегона Deportivo 18 de Marzo – Indios Verdes. Конечная станция в режиме последовательного оборота (слева ТИОj [n] = 105 с, справа ТИОj [n] = 115 с)



В рассмотренных зависимостях время стоянки идущего впереди поезда берется как известное, однако если на момент вычисления сигнала управления поезд еще не отправился к расчетному пункту, то известно лишь плановое время его стоянки, которое может отличаться от фактического. Замена фактической длительности стоянки плановой при формировании управления может привести к ряду проблем. В адаптивной модели определение отклонения длительности стоянки поезда на последующей станции до его прибытия на нее прогнозируется с учетом известных отклонений от плановой длительности:

$$T_{Cj+1}^*[n-l] = T_{Cj+1}^r[n-l] + F_{Cj+1}^*[n-l] \quad (15)$$

где $T_{Cj+1}^r[n-l]$ – плановая длительность стоянки идущего впереди поезда на следующей станции;

$F_{Cj+1}^*[n-l]$ – прогнозируемое отклонение длительности стоянки идущего впереди поезда на следующей станции от плановой (экстраполируется по известным фактическим значениям этой величины на соот-

ветствующей станции для некоторого количества поездов по методу наименьших квадратов по методике, изложенной в [4]);

$T_{Cj+1}^*[n-l]$ – прогнозируемая длительность стоянки идущего впереди поезда на следующей станции.

Оценка погрешности прогноза величины $F_{Cj+1}^*[n-l]$ показала, что он эффективен при учете 3–5 идущих впереди поездов. Разработанный алгоритм прогнозирования учитывает «отсечку» пассажиров машиной при превышении допустимой длительности стоянки поезда. Способ прогнозирования удобен, поскольку прогноз не зависит от заданного по графику движения изменения длительности плановых стоянок от времени, что делает его равноэффективным в часы «пик», «не пик», а также во время дождя на открытых перегонах, вследствие чего за дополнительными скоростными ограничениями возможно изменение длительностей стоянок.

Фрагменты планового и исполненного графиков движения поездов по линии представлены на рис. 12 и 13. Начало дождя в некоторый момент движения является причиной введения дополнительного скоростного ограничения 35 км/ч на всех открытых участках линии (рис. 1).

Влияние возмущения на работу линии можно оценить по таким критериям качества, как, например: количество остановок по сигналам систем безопасности движения, расход электроэнергии на тягу поездов, время незанятости платформ. При-

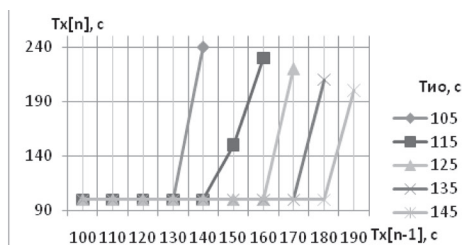


Рис. 11. Регулировочная характеристика перегона Deportivo 18 de Marzo – Indios Verdes для спектра интервалов. Конечная станция в режиме параллельного оборота.

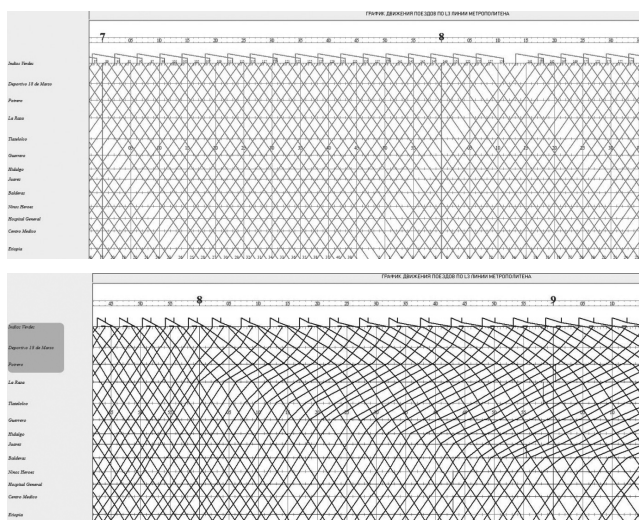


Рис. 12. Фрагмент ПГД поездов в период утреннего часа «пик».

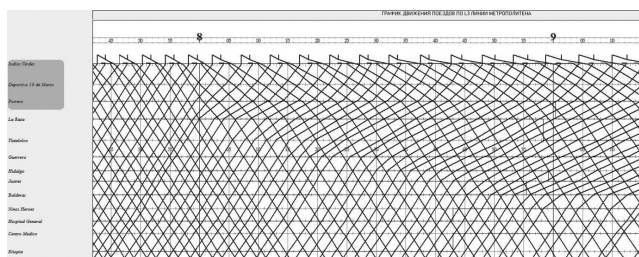


Рис. 13. Фрагмент ИГД:
утренний час «пик»;
момент начала дождя
8.00 ч (открытые
перегоны выделены
прямоугольником).

чем тут есть свои очевидные взаимозависимости. Допустим, сокращение числа остановок по сигналам системы обеспечения безопасности снижает потребление электроэнергии на тягу поездов и повышает комфортность пассажироперевозок.

ВЫВОДЫ

Моделирование показало, что использование графико-интервального алгоритма без учета зависимости ограничений на управление от состояния системы [1] не позволяет значительно повлиять на изменения критериев качества при возмущении такого рода.

Применение нового алгоритма дало возможность сократить количество остановок по запрещающим сигналам светофоров до 30–50% в зависимости от размеров движения. Расход электроэнергии при этом снизился на 5–10%.

Полученные результаты дают основания рекомендовать алгоритм метрополитену г. Мехико, подтверждают его перспективность

и необходимость учитывать зависимость ограничений на управление от состояния системы на загруженных линиях мегаполиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава. — М.: Транспорт, 1990.
2. Баранов Л. А., Воробьев П. Ю. Адаптивная модель длительности стоянки поезда метрополитена для формирования ограничений на управление // Труды XI научно-практ. конференции «Безопасность движения поездов». — М: МИИТ, 2010.
3. Баранов Л. А., Балакина Е. П., Воробьева Л. Н. Алгоритмы для поездов метрополитена // Мир транспорта. — 2007. — № 2.
4. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Воробьев П. Ускорение высадки и посадки пассажиров метрополитена за счет изменения геометрии вагона // Труды XII научно-практ. конференции «Безопасность движения поездов». — М.: МИИТ, 2011 г.
6. Официальный интернет-сайт метрополитена г. Мехико — <http://www.metro.df.gob.mx>.
7. Официальный интернет-сайт московского метрополитена — <http://www.mosmetro.ru>.

MEXICO CITY METRO: ALGORITHMS OF TRAFFIC

Baranov, Leonid A. – D. Sc. (Tech), professor, head of the department of control and informatics in technical systems of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Vorobiev, Pavel Yu. – MSc (Tech), Ph. D. student at the department of control and informatics in technical systems of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors study scheduled interval algorithm of centralized automatic control of metro train traffic, which takes into account dependencies between adjusting restrictions and system conditions. They use adaptive model of train stop time, which allows for the history of departures of the schedule of leading trains, previously departed from the same line's stations. The algorithm is engineered for Mexico City metro and takes into account its features.

Key words: metro, Mexico city, train traffic, automatic control system, control algorithm.

Координаты авторов (contact information): Баранов Л. А. – baranov.miit@gmail.com, Воробьев П. Ю. – pavelvorobiev@yahoo.com.