

Влияние планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на режим работы системы тягового электроснабжения

// An influence of the underground train planned schedule on the traction energy supply system //

Сафронов А.И.,
Сидоренко В.Г., д.т.н., профессор,
Московский государственный университет путей сообщения
(МИИТ), г. Москва

Рассматривается влияние планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на режим работы системы тягового электроснабжения. Сформулирована задача постановки некоторого, возможно, неопределенного к рассматриваемому моменту времени маршрута по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки, и приведено её решение. Приведены результаты решения этой задачи для различных наборов исходных данных. Сформулированы критерии оценки качества полученных результатов. Ключевые слова: метрополитен, плановый график движения поездов, автоматизированное построение, задача ночной расстановки, система тягового электроснабжения, реализация графика оборота, нитка графика, точка ночной расстановки.

In article an influence of the underground train planned schedule on the traction energy supply system is considered. The problem of parking one, probably, unknown train route in a given point of time, to the certain parking point through the selected train path is formulated and solved. The results of the solution for different given data sets are shown. Criteria for the quality evaluating of the obtained results are formulated. Keywords: underground, train planned schedule, automated construction, night parking problem, traction energy supply system, schedule of repair realisation, train path, night parking point.

Работы на Московском метрополитене проводятся круглосуточно. В связи с этим функционирование метрополитена можно рассматривать как периодический процесс, в котором ярко выражены два полупериода: дневной и ночной. В дневной полупериод организация работ направлена на обеспечение нужд населения города Москвы, а в ночной полупериод – самого метрополитена. Нуждами метрополитена в этом случае является поддержание инфраструктуры в исправном состоянии. Ночной полупериод функционирования метрополитена посвящён проведению диагностических и ремонтных работ на станциях и в тоннелях метрополитена. Движение электропоездов в этот полупериод отсутствует, так как одним из условий проведения работ на станциях и в тоннелях является отсутствие напряжения на контактном рельсе. В связи с этим на организацию таких работ оказывает существенное влияние время окончания движения электропоездов, которое определяется плановым графиком движения (ПГД) пассажирских поездов метрополитена. Время окончания движения электропоездов при заданном времени отправления с конечной станции пути последнего пассажирского поезда, следующего через все платформы стан-

ций этого пути, рассматривается как один из критериев качества ПГД. Данная статья посвящена вопросу автоматизации построения ПГД с учетом этого критерия.

ПГД включает в себя несколько процессов, определяемых технологией работы метрополитена [1]:

- стационарные, в ходе которых парность остаётся постоянной в течение времени, большего, чем время полного оборота состава; к ним относятся движение поездов с заданной максимальной парностью в утренний и вечерний час «пик», а также движение поездов с заданной минимальной парностью в дневной час «непик»;
- переходные, которые возникают при изменении парности движения и соединяют стационарные процессы; к ним относятся выход составов из ночной расстановки, переходы к движению с максимальной парностью в утренний и вечерний час «пик», переход к движению с минимальной парностью в дневной час «непик», переход от вечернего часа «пик» к вечернему часу «непик», уход составов на ночную расстановку.

Время окончания движения электропоездов определяется в результате построения процесса ухода составов на ночную расстановку. Рассмотрим решение задачи

ночной расстановки составов с учетом выбранного критерия – минимизации времени окончания движения электропоездов.

После завершения пассажирского движения маршруты, ночующие на линии, должны оказаться в тех точках ночной расстановки, из которых утром выйдут следующие маршруты [2]. Составы могут находиться в депо, на главных и станционных путях. В выходные дни составы двигаются под теми номерами маршрутов, которые получили в последний рабочий день, то есть в выходные дни следующим маршрутом для каждого маршрута является тот же маршрут. По чётным и нечётным числам для ночной расстановки составов используются разные точки ночной расстановки. Это определяется необходимостью проведения работ по осмотру и ремонту путей.

Расположение точек ночной расстановки зависит от географии линии. Порядок заполнения точек ночной расстановки является функцией местоположения этих точек и требований к моменту их заполнения. В статье [2] предложено использовать для формализации описания последовательности заполнения и освобождения точек ночной расстановки (эти последовательности могут различаться) древовидные графы (деревья). Точки ночной расстановки могут заполняться и освобождаться несколькими способами, которые могут различаться и первой заполняемой (освобождаемой) точкой ночной расстановки, поэтому можно говорить о существовании леса (лесом является несвязанный неориентированный граф без циклов) [3].

Реализация процесса ухода составов на ночную расстановку наряду с выполнением заданной (изменяющейся во времени) парности движения в течение всего времени движения пассажирских поездов и реализацией графика оборота (ГО), который регулирует проведение осмотров и ремонтов подвижного состава, является целью управления, на достижение которой направлено построение ПГД. Реализация процесса ухода составов на ночную расстановку определяется выполнением ряда условий, к которым относятся:

- заполнение составами всех точек ночной расстановки линии;
- отсутствие несвязанных ниток;
- отсутствие незадействованных в пе-

ревозочном процессе маршрутов;

- отсутствие выполненных и незаконченных осмотров и ремонтов;
- однозначное соответствие назначения маршрутов, выходящих из точки ночной расстановки утром и уходящих к точке ночной расстановки вечером.

Последнее можно формализовать следующим образом

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

где N_M – общее количество маршрутов линии;

\mathbf{m}_i – i -й маршрут линии метрополитена;

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

$\mathbf{m}_i: \mathbf{p}_{NR}^s$ – точка ночной расстановки, из которой вышел маршрут $\mathbf{m}_i: \mathbf{m}_N$;

$\mathbf{m}_i: \mathbf{p}_{NR}^e$ – точка ночной расстановки, в которую уходит маршрут \mathbf{m}_i .

Исходными данными для построения процесса ухода составов на ночную расстановку являются:

- время окончания пассажирского движения;
- парность движения в последнем такте задания размеров движения;
- точки ночной расстановки составов на линии;
- последовательность заполнения точек ночной расстановки;
- положение маршрутов к моменту ухода составов на ночную расстановку.

Условно процесс организации ухода составов на ночную расстановку разбивается на две части:

- постановку составов к точкам ночной

расстановки, расположенным на линии по каждому из главных путей;

- снятие в депо составов, которые должны в нем ночевать по каждому из главных путей.

Организация движения маршрутов в последовательности, необходимой для обеспечения правильной ночной расстановки составов, производится путём выполнения регулировочных действий. Формализовать построение процесса можно, определив связь исходных данных с регулировочными действиями, которые необходимо выполнить для организации корректной ночной расстановки составов.

В качестве исходных данных для описания ситуации, складывающейся при решении задачи постановки некоторого, возможно, неопределенного к рассматриваемому моменту времени, маршрута по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки, являются предикаты, которые описывают отношения, связывающие те или иные объекты [4, 5].

Совокупность этих предикатов полностью описывает ситуацию, складывающуюся при решении задачи постановки маршрута по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки. Каждый из этих предикатов и результат проверки каждого условия может принимать одно из двух значений: истина («+») или ложь («-»). При проверке некоторых условий значение того или иного предиката может не оказывать влияния на результат. В этом случае в соответствующей ячейке таблицы ставится знак «*». Количество возможных вариантов ситуаций, которые описываются этими предикатами, равно $2^6 = 64$.

Зная значения перечисленных предикатов, можно проверить условия, представленные в таблице 1.

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

Каждое из ЛТП может включать в себя три этапа:

- поиск маршрута, который может быть отправлен по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки; поиск может проводиться с учётом разных данных и условий (на базе анализа только данных ГО; на базе анализа последовательностей ниток, по которым двигались маршруты в разное время суток; на базе анализа маршрутов, находящихся в линейном пункте технического осмотра (ПТО));

- определение необходимости выполнения размена (переназначения маршрута на нитку), если назначенный на нитку маршрут не является тем, который может быть отправлен по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки; способ выполнения разрыва определяется временем и местом его выполнения;

- выполнение маневровых действий, необходимых для решения задачи; маневровые действия могут заключаться в удалении всей последовательности ниток; переходе к следующему поезду; привязке нитки к точке ночной расстановки или депо вечером; назначении маршрута на нитку; назначении следующего маршрута на точку ночной расстановки утром; назначении предыдущего маршрута на нитку;

Таблица 1. Пример выбора регулировочных действий.

Множества данных	Элементы множеств данных	Значения предикатов и условий; назначенные действия
Исходные данные (предикаты)	Указанная точка ночной расстановки находится на линии или в депо?	На линии
	Существует возможность постановки состава к указанной точке ночной расстановки до проследования последнего пассажирского поезда?	Не существует
	Маршрут, выпускаемый из указанной точки ночной расстановки, определён?	Не определён
	Где находится маршрут, предшествующий тому, который выпускается из указанной точки ночной расстановки (находится в депо или назначен на последовательность ниток, для которой место ночной расстановки не определено)?	На линии
	Выбранная последовательность ниток начинается после 22:00 (после окончания процесса равномерного снятия составов после вечернего часа «пик») или до этого момента?	Последовательность полная, начинается до 22:00.
	На выбранную последовательность ниток назначен маршрут?	Маршрут не назначен
Результат проверки условий	На выбранную нитку назначен маршрут, который может быть поставлен к указанной точке ночной расстановки без проведения дополнительных маневровых передвижений?	Нет
	После назначения маршрута на выбранную нитку в ПГД окажется две нитки, по которым одновременно должен двигаться один и тот же маршрут?	Да
Действия (императивы)	Поиск подходящего маршрута	$\sigma(+)$ $\delta(*)$
	Размен	$\rho_{ин}(+)$
	Маневровые действия	$M_{т.н.р.}^{след.}, \Omega, N$

выход маршрута из депо; выборе подходящего депо по направлению для выпуска маршрута из депо.

Реализация ЛТП учитывает культуру обслуживания пассажиров, то есть уход и выход составов не производится чаще установленных нормативных значений.

С использованием описанных предикторов, условий и ЛТП формализованы все ситуации, которые могут сложиться при решении задачи постановки маршрута по выбранной нитке к указанной точке ночной расстановки. Эти соотношения являются основой для составления сценария построения процесса ухода составов на ночную расстановку. В таблице 1 приведено описание одного из вариантов.

Рассмотрим ситуацию, когда поезд, находящийся на линии, необходимо отправить к точке ночной расстановки на линии. При этом известно, что выбранная последовательность ниток полная, маршрут не назначен ни на рассматриваемую нитку, ни на точку ночной расстановки. В этих условиях о своевременности ухода к точке ночной расстановки судить бессмысленно. Для такого случая всегда организуется общий поиск маршрута σ (без учёта детальных условий построения ПГД). Далее авторами рассматривается благоприятный случай, когда общий поиск принёс результат $\sigma(+)$. В этом случае не требуется проводить уточняющий поиск $\delta(*)$. После назначения маршрута на выбранную нитку в ПГД окажется две нитки, по которым одновременно должен двигаться один и тот же маршрут, поэтому необходимо выполнить разрыв последовательности в час «непик» $\rho_{ин}$. Если разрыв выполнен успешно $\rho_{ин}(+)$, то на последовательность слева, как и на точку ночной расстановки, утром назначается маршрут, следующий к найденному маршруту, а на последовательность, остающуюся справа, назначается найденный маршрут. Производится постановка этого маршрута к точке ночной расстановки вечером. Эта ветвь действий

завершается переходом к следующему поезду.

Разработанный сценарий построения процесса ухода составов на ночную расстановку реализован в автоматизированной системе построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена, созданной на кафедре «Управление и информатика в технических системах» МГУПС (МИИТ) и внедренной на Московском метрополитене [4].

Для проверки функционирования разработанных сценариев были взяты два принципиально отличающихся друг от друга набора исходных данных ПГД для Кольцевой линии: на зиму 2009 года и на зиму 2012 года. За это время на Кольцевой линии существенно изменилась парность движения, ночная расстановка составов, а также полностью обновился электроподвижной состав (ЭПС). Это повлекло за собой перемены одновременно в ГО, количестве точек ночной расстановки и последовательности их заполнения (освобождения).

Кроме времени завершения движения по каждому из главных путей сравнение вариантов ПГД проводилось по следующим показателям:

- количеству разменов маршрутов через депо;
- количеству регулировочных отстоев на станционных путях линии;
- общей (суммарной) длительности регулировочных отстоев;
- средней длительности регулировочных отстоев;
- максимальной длительности регулировочных отстоев.

Количество вариантов реализации выхода составов из ночной расстановки при одних и тех же исходных данных зависит от:

- числа деревьев, построенных для каждой станции, на которой есть точки ночной расстановки, и определяющих по-

следовательность заполнения точек ночной расстановки;

• числа маршрутов, которые могут быть поставлены к точке ночной расстановки в каждом из деревьев. Эта зависимость формализуется следующим образом

$$\Upsilon_{UNR} = \prod_{j=1}^2 \prod_{i=1}^{N_s} \prod_{k=1}^{N_{ij}} \sum_{l=1}^{N_{mtijk}} \sum_{q=1}^{N_{umtijkl}} M_{umtijkl} \quad (2)$$

где N_s – количество станций линии;

N_t^s – количество деревьев на i -й станции по Φ -му пути;

N_{mtijk} – число конечных узлов в k -м дереве на i -й станции по j -му пути;

$N_{umtijkl}$ – число узлов в траектории движения от корня дерева до l -го конечного узла в k -м дереве на i -й станции по j -му пути;

$M_{umtijkl}$ – число маршрутов, которые могут быть поставлены к q -й точке ночной расстановки при движении к l -му конечному узлу в k -м дереве на i -й станции по j -му пути.

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. Для сравнения рассматривались первые 35 успешно реализованных вариантов [6]. Успешно реализованные варианты построения для одних и тех же исходных данных незначительно отличаются по количеству регулировочных действий. Уменьшение количества регулировочных действий позволяет повысить живучесть системы.

Анализ показал, что изменение исходных данных заметно влияет на такие показатели качества ПГД, как количество и длительность разменов маршрутов. Для данных 2012 года значения этих показателей выше, чем для данных 2009 года. Это характерно и для значений этих же показателей, полученных для графиков, построенных работником группы графи-

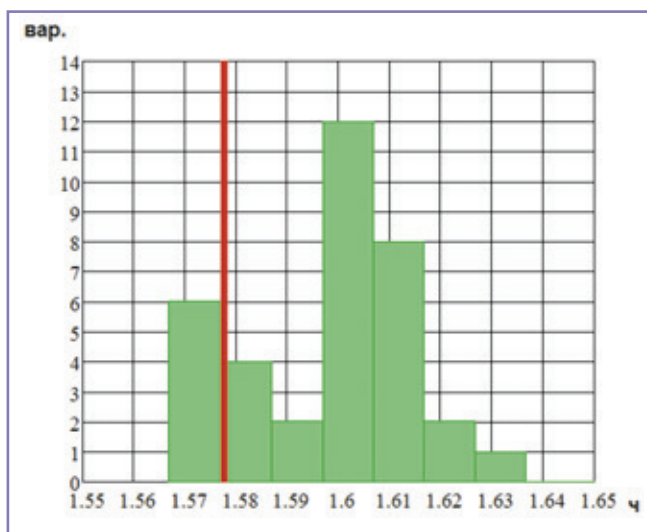


Рис. 1. Распределение времён завершения движения по I главному пути.

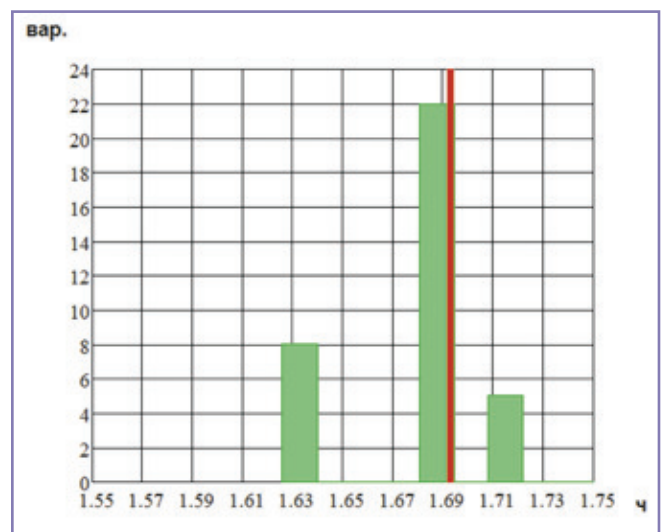


Рис. 2. Распределение времён завершения движения по II главному пути.

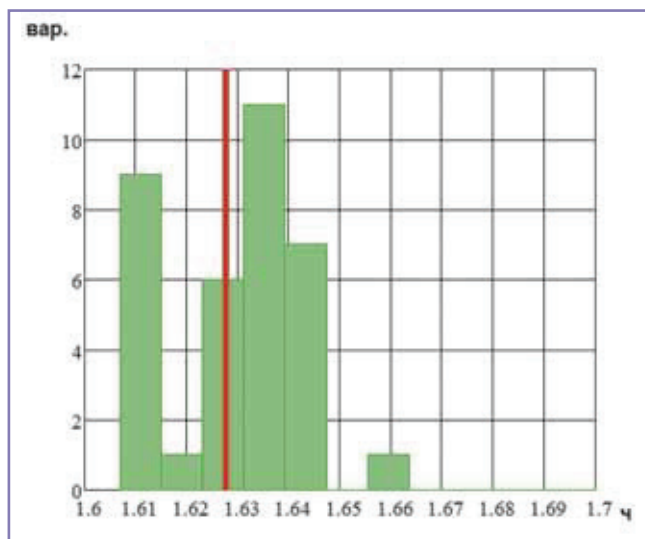


Рис. 3. Распределение времён завершения движения по I главному пути.

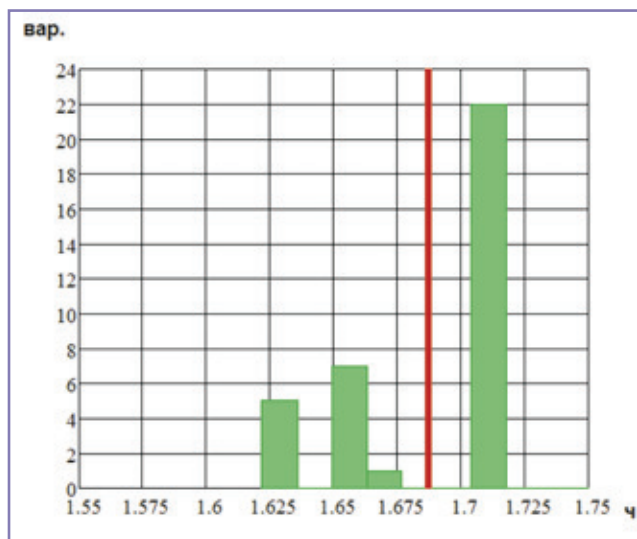


Рис. 4. Распределение времён завершения движения по II главному пути.

стов Службы движения Московского метрополитена.

На гистограммах рис. 1–2 показано распределение времён завершения движения по каждому из главных путей в результате автоматизированного построения ПГД для Кольцевой линии по данным 2009 года.

На гистограммах рис. 3–4 показано распределение времён завершения движения по каждому из главных путей в результате автоматизированного построения ПГД для Кольцевой линии по данным 2012 года.

В ходе перебора возможных вариантов построения ПГД найдены варианты, реализующие меньшее время завершения движения по сравнению с графиками, построенными работником группы графиков Службы движения Московского метрополитена, без увеличения числа регулировочных действий. На рис. 1–4 моменты времени, соответствующие завершению движения для графиков, построенных работником группы графиков Службы движения Московского метрополитена, отмечены вертикальной красной прямой.

Таким образом, автоматизация построения ПГД способствует улучшению условий проведения технологических работ, связанных с функционированием системы тягового электроснабжения метрополитена.

Литература:

1. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Построение планового графика движения для метрополитена // Мир транспорта. 2011, № 3. – С. 98–105.
2. Пискунов А.С., Сидоренко В.Г. Процедуры организации ночной расстановки составов на линии метрополитена // ВЕСТНИК МИИТа // Научно-технический журнал. М.: МИИТ. 2008, вып. 18. – С. 3–7.
3. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. – М.: Энергия, 1980. 344 с.
4. Сафронов А.И. Автоматизированное построение процесса ухода составов на ночную расстановку при учёте уровней равномерности // Труды XII научно-практической конференции «Безопасность Движения Поездов». – М.: МИИТ, 2011. – с. IX–12–IX–13.
5. Козлов В.П. Методы управления линией метрополитена на основе формального представления диспетчерских знаний с помощью ассоциативных схем. – М.: ВНИИЖТ, 1985. 14 с. Деп. в ЦНИИЭИ МПС 29.01.85, N 2741.
6. Вентцель Е.С. Теория Вероятностей. 4-е издание. Под ред. Баевой А.П.. – М.: Издательство «Наука», 1969. 576 с.

Сафронов Антон Игоревич – родился в 1987 году. В 2009 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Управление и информатика в технических системах». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает ас-

систентом на кафедре «Управление и информатика в технических системах» МГУПС (МИИТ). Имеет 23 научных труда.

Сидоренко Валентина Геннадьевна – родилась в 1972 году. В 1994 году окончила Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Автоматика и управление в технических системах». Доктор технических наук, профессор. Опыт работы -18 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Управление и информатика в технических системах» МГУПС (МИИТ). Имеет 130 научных трудов.

Safronov Anton – was born in 1987. In 2009 graduated from Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) with a degree in “Management and informatics in technical systems”. He has 5 years of work experience. At the present time he works as a professor of “Management and informatics in technical systems” department of MIIT. He has 23 publications.

Sidorenko Valentina – was born in 1972. In 1994 graduated from State University of Railway Engineering (MIIT) with a degree in “Automatics and management in technical systems”. Doctor of Engineering Science, professor. She has 18 years of work experience. At the present time he works as a professor of “Management and informatics in technical systems” department of MIIT. She has 130 publications.