

## СЦЕНАРНОЕ ПРОСТРАНСТВО ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНОВОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Рассмотрены условия оценки построения всех процессов планового графика движения пассажирских поездов метрополитена. Введены понятия: условия реализуемости, условия реализации, условия успешной реализации, целостность графика. Определено влияние изменения числа пар поездов в час (парности) на процессы построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена.

*Ключевые слова:* метрополитен, плановый график движения поездов, автоматизированное построение, условия реализации



**А.И. Сафронов**



**В.Г. Сидоренко**

**Р**итм жизни современных крупных городов и мегаполисов довольно велик. Действовать и принимать решения во многих сферах человеческой деятельности приходится крайне быстро, порой, даже на пределах человеческих возможностей. В связи с этим возросла актуальность таких процессов, как планирование, расстановка приоритета, рационализация, оптимизация и экономия. В сложных системах все эти процессы тесно связаны друг с другом.

Рассмотрим задачу планирования движения пассажирских поездов на примере Московского метрополитена. Вопрос автоматизации решения данной задачи затронут давно, ему посвящён целый ряд работ российских учёных [1–3]. Не так давно, в связи с бурным развитием вычислительной техники, накопленная база знаний из теоретической области стала переходить в практическую [4–7].

Методика автоматизированного построения ПГД заключается в выделении процессов, происходящих на линии, и сопоставлении им фрагментов ПГД. Происходящие на линии процессы делятся на переходные и установившиеся. Установившимся процессом будем называть процесс, при котором число пар поездов в час (парность) остается постоянным в течение времени, большего, чем время полного оборота состава. Наибольшую сложность представляет переход от одного установившегося процесса к другому, и этот переход будем называть переходным процессом [4]. Переходный процесс должен быть построен таким образом, чтобы к заданному моменту времени создать все условия для работы в установившемся процессе. В соответствии с технологией работы метрополитена и изменением пассажиропотока в течение суток имеется определённая последовательность установившихся и

**Сидоренко Валентина Геннадьевна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Область научных интересов: автоматизированное и автоматическое управление. Автор 137 научных работ.

**Сафронов Антон Игоревич**, аспирант кафедры «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). Область научных интересов: автоматизированное и автоматическое управление. Автор 10 научных работ.

переходных процессов. ПГД в рабочие дни описывает следующие процессы:

- выход составов из ночной расстановки (переходный процесс);
- движение поездов с заданной парностью в утренний час «пик» (установившийся процесс);
- движение поездов между утренним часом «пик» и движением в непиковое время (переходный процесс);
- движение в непиковое время (установившийся процесс);
- организация перехода к вечернему часу «пик» (переходный процесс);
- движение поездов с заданной парностью в вечерний час «пик» (установившийся процесс);
- переход от вечернего часа «пик» к непиковому движению (переходный процесс);
- организация перехода от непикового движения к ночной расстановке (переходный процесс).

В ряде случаев возможно изменение последовательности процессов в зависимости от проводимых в городе мероприятий. В выходные дни процессы 3-7 отсутствуют, так как в течение всего дня поддерживается постоянная парность движения. Сразу отметим, что все процессы, происходящие на линии, имеют свои характерные особенности [5]. Построение ПГД требует проверки возможности его реализуемости по заданным исходным данным при безусловном выполнении всех имеющихся ограничений. Условия реализуемости ПГД связаны с создаваемыми фрагментами графика, соответствующими определённым процессам.

Под условиями реализуемости будем понимать априорную информацию, которая позволяет заранее определить, удастся ли с заданными начальными условиями построить процесс.

Условиями реализации назовём апостериорную информацию, получаемую по итогам построения переходного/установившегося процесса путём проверки графика после завершения рассматриваемого процесса и позволяющую определить, удалось ли построить процесс с заданными начальными условиями. Договоримся термин «условия реализации» употреблять применительно к построению отдельных процессов ПГД, а термин «условия успешной реализации» — применительно к графику, составленному на весь день.

В качестве модели, описывающей последовательность, взаимосвязь и рекурсивность вызова процедур построения ПГД, авторами была предложена схема автоматизированного построения ПГД [5]. После замены на схеме отметок рекурсивности вызова процедур на отметки проверки процессов ПГД на реа-

лизуемость и реализацию получаем схему, описывающую сценарное пространство построения ПГД (рис. 1).

Порядковый номер процесса, отмеченного на схеме, — это его порядковый номер в последовательности построения ПГД. Направление движения по схеме — от центра. Рассмотрим маркировку. Частым пунктиром обозначены моменты контроля расчётных или вводимых данных. Редкий пунктир означает, что для рассматриваемого процесса построения устанавливается проверка реализуемости. Непрерывной линией отмечены процессы, для которых характерна проверка реализации. Наконец, чередующиеся две точки - тире означают, что рассматриваемый процесс автоматизированного построения ПГД предусматривает проверку успешной реализации всего графика.

Авторами выполнен анализ всех процессов ПГД и формализованы условия реализуемости и реализации этих процессов. Эта формализация составлена для линий двух типов: радиальных и кольцевых. Рассмотрим эту формализацию в естественном порядке следования процессов, согласно рассмотренному ранее режиму работы Московского метрополитена в рабочие дни. Сразу отметим, что для радиальных линий характерным для всех процессов построения ПГД условием реализуемости является контроль ограничений на организацию станционных оборотов с учетом числа маневровых бригад в рассматриваемом интервале времени [4]. Перейдём к непосредственному рассмотрению процессов автоматизированного построения ПГД.

В процессе построения выхода составов из ночной расстановки основным условием реализуемости независимо от типа линии является контроль за числом оставшихся несвязанными с «нитками» точек ночной расстановки (указателей) на линии и числом составов, которые не выпущены из депо. Их сумма должна быть не меньше количества ниток, для которых не определен флаг начала движения от указателя или выхода из депо:

$$\sum_{i=1}^{N_n} n_i | (n_i : f \lg Start = 0 \wedge n_i : n_{pn} = \emptyset) \leq \sum_{j=1}^{N_{pNR}} p_{NR_j} : C, \quad (1)$$

где  $N_n$  — число «ниток» графика;

$n_i$  — «нитка» графика;

$n_i : f \lg Start$  — компонент последовательности «нитка»  $n$  — флаг начала, определяющий тип маневровой работы с маршрутом до начала движения по нитке графика;

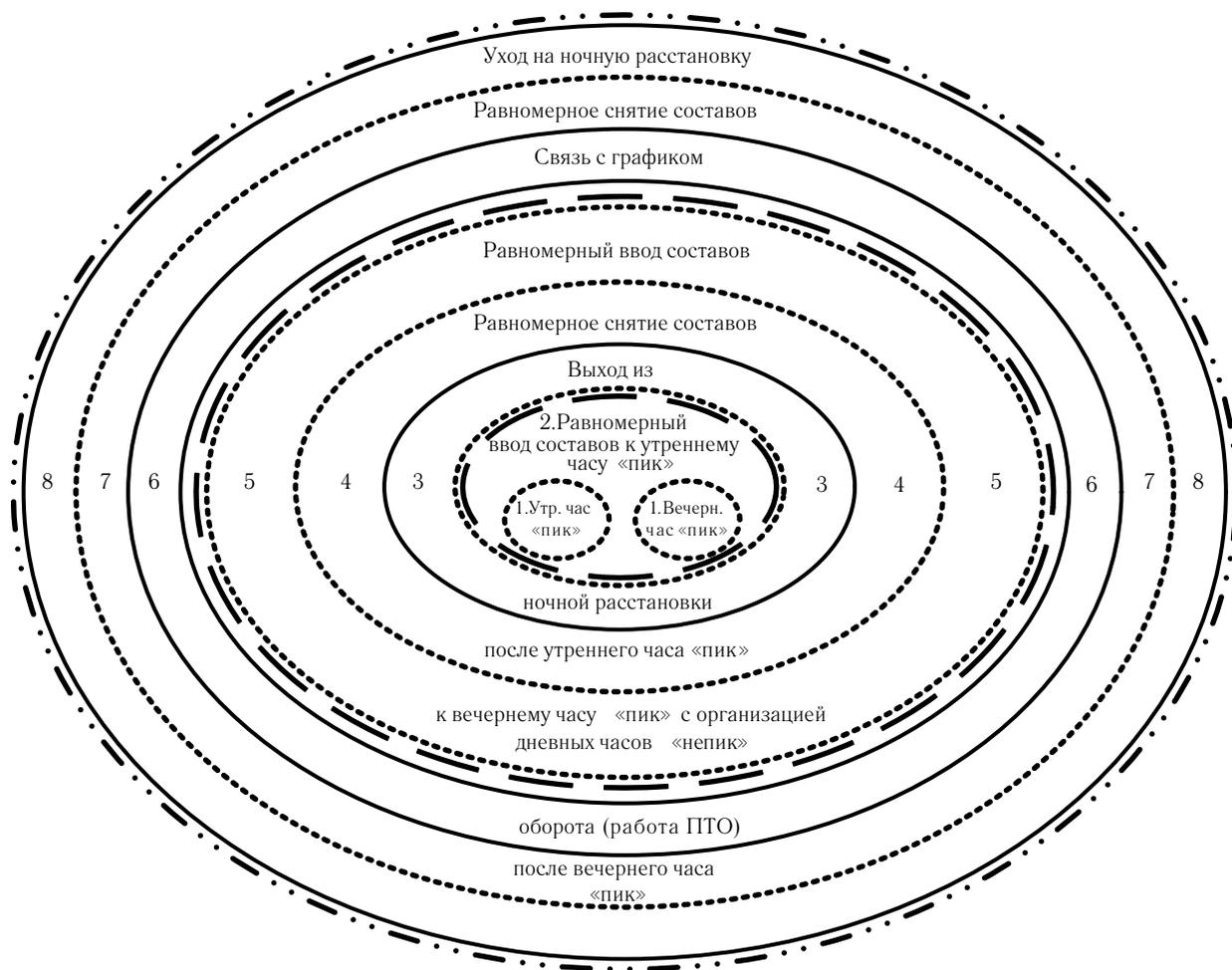


Рис. 1. Схема сценарного пространства построения ПГД

$n_i; n_{pn}$  – предыдущая «нитка» к «нитке»  $n$ , то есть «нитка», по которой маршрут двигался до начала движения по «нитке»  $n$  (до оборота);

$N p_{NR}$  – общее число точек ночной расстановки на

линии, используемых при заданной расстановке;

$p_{NR_j} : C$  – ёмкость  $j$ -й точки ночной расстановки.

По завершению построения процесса выхода составов из ночной расстановки необходимо проверить график на отсутствие несвязанных ниток (у которых отсутствует признак начала движения от указателя или выхода из депо).

$$\sum_{i=1}^{N_i} n_i | (n_i : flg Start = 0 \wedge n_i : n_{pn} = \emptyset) = 0. \quad (2)$$

Условие реализуемости процесса равномерного ввода составов перед утренним часом «пик» независимо от типа линии включает в себя две части: условие реализуемости процесса выхода составов

из ночной расстановки (1) и условие реализуемости выхода из каждого депо. Последнее можно сформулировать следующим образом: «из каждого депо на линию может быть выпущено не больше составов, чем там могло ночевать».

$$\sum_{i=1}^{N_d} (n_i : p_{NR}^s = d_j : p_{NR}) \leq d_j : p_{NR} : C, \quad j=1 \dots N_d, \quad (3)$$

где  $d_j$  –  $j$ -е депо линии;

$N_d$  – количество депо линии;

$d_j : p_{NR} : C$  – ёмкость  $j$ -го депо линии;

$n : p_{NR}^s$  – компонент последовательности «нитка»  $n$  – точка выхода из ночной расстановки.

Утренний и вечерний часы «пик» в отношении проверки условий реализуемости и реализации могут быть рассмотрены как аналогичные процессы. Это объясняется свойствами зеркальной симметрии ПГД [5] относительно дневного часа «непик». Для построения этого процесса необходимо, чтобы общее число

составов, обслуживающих кольцевую линию, соответствовало распределению составов по главным путям. В случае радиальной линии необходимо знать, нужно ли проводить построение графика зонного типа (ГЗТ) или нет [6]. Общим условием реализуемости этапа является контроль соответствия заданной парности заданному числу составов, обслуживающих линию:

$$N_M - RD_j : M_{\text{НВ}} \geq RD_j : M_{\text{потр}}, \quad (4)$$

где  $N_M$  — общее количество маршрутов линии;

$RD_j$  — последовательность «размеры движения», компоненты которой задаются на один астрономический час. Основными компонентами последовательности являются: время начала размера движения, время завершения размера движения, парность, интервал, время полного оборота составов, количество составов на первом главном пути, количество составов на втором главном пути, общее количество составов на главных путях;

$j$  — номер компонента последовательности «размеры движения», соответствующий определённому такту часа «пик». Номер компонента последовательности также является и порядковым номером такта;

$RD_j : M_{\text{НВ}}$  — количество составов, которые по тем или иным причинам не участвуют в движении в  $j$ -м такте;

$RD_j : M_{\text{потр}}$  — количество составов, необходимое для заданной парности в  $j$ -м такте движения.

Процессы построения часов «пик» отличаются тем, что условия реализуемости совпадают с условиями реализации (если процесс построения при упомянутых условиях реализуем, то он обязательно будет реализован).

Перед построением процесса равномерного снятия составов после утреннего часа «пик» необходимо проверить, не меньше ли сумма числа точек отстоя на линии и числа составов, которые могут быть отправлены в депо, чем количество составов, которые должны быть сняты после утреннего часа «пик». Результат построения данного процесса нуждается в строгом контроле, поскольку многое зависит от правильности распределения ремонтов и осмотров в соответствии с графиком оборота. Проверка реализации процесса также подразумевает, что в депо отправлено составов не больше, чем оно способно принять на время дневного часа «непик».

Поскольку утренний и вечерний часы «пик» строятся как независимые части графика, то их, в конечном итоге, необходимо соединить. В связи с этим в качестве условия реализации рассматриваемого процесса принимаем связь независимых частей графика. Основным признаком связи независимых частей графика является наличие у каждой «нитки» в период

дневного часа «непик» предыдущих и следующих «ниток».

Процесс равномерного ввода составов перед вечерним часом «пик» аналогичен процессу равномерного ввода составов перед утренним часом «пик» за тем исключением, что результат построения контролируется по количеству выпущенных составов — их должно быть не больше, чем отстаивалось в депо в период дневного часа «непик».

К моменту организации ухода составов на ночную расстановку необходимо, чтобы все ремонты и осмотры составов согласно графику оборота были проведены и, исходя из этого, на нитки были назначены маршруты. Таким образом, процессы равномерного снятия составов после вечернего часа «пик» и ухода составов на ночную расстановку подразумевают обязательную проверку распределения ремонтов и осмотров. В остальном контроль этих процессов аналогичен тому, который проводится до и после построения равномерного снятия составов после утреннего часа «пик» и выхода составов из ночной расстановки, соответственно. В связи с аналогичностью условий реализуемости и реализации переходных процессов равномерного ввода и снятия составов, что соответствует принципу зеркальной симметрии ПГД [5], формализация этих условий приведена только для первого рассмотренного переходного процесса.

Успешная реализация построения ПГД заключается в назначении соответствующих маршрутов на нитки, выполнении всех ремонтов и осмотров, а также в отсутствии на графике несвязанных ниток (для которых не установлен признак связи с депо, точкой ночной расстановки или связи с одной из ниток последовательности). Ограничение, накладываемое на решение задачи построения планового графика и определяющее правильность ночной расстановки составов, формализуется следующим образом: все маршруты в результате движения по нитке конца движения должны прийти в ту же точку ночной расстановки, из которой начинается нитка начала движения этого же состава на следующий день [7]:

$$\sum_{i=1}^{N_M} \begin{cases} 1, & \text{если } f_{LN}(M_i) : p_{NR}^e = f_{FN}(M_i : M_N) : p_{NR}^s = N_M, \\ 0, & \text{если } f_{LN}(M_i) : p_{NR}^e \neq f_{FN}(M_i : M_N) : p_{NR}^s \end{cases} \quad (6)$$

где  $M_i$  —  $i$ -й маршрут линии, назначенный на текущий день;

$M_i : M_N$  — маршрут, назначаемый составу маршрута  $M_i$  на следующий день;

$f_{FN}(M_i)$  — функция определения «нитки» начала движения маршрута  $M_i$ ;

$p_{NR}^e$  — компонент последовательности «нитка»  $n$  — точка ухода на ночную расстановку.

Автоматизации построения графика движения связана с перебором большого числа вариантов в каждом переходном процессе построения ПГД. Уменьшение числа перебираемых вариантов основывается на исключении заведомо нереализуемых вариантов, причём, чем раньше удастся выявить их, тем меньше общее число операций, необходимое для поиска решения, а значит, меньше и время, затрачиваемое на построение самого графика.

Помимо проверки условий реализуемости и реализации процессов автоматизированного построения ПГД, ещё одной важной составляющей контроля является определение области допустимых значений исходных данных для построения ПГД. Изменение одних исходных данных может оказывать влияние на область допустимых значений других исходных данных. Заданная парность движения непосредственно связана со временем хода составов по линии и числом этих составов на линии. Следует учитывать, что допустимое число составов на линии не должно превышать число составов, участвующих в перевозке

пассажиров и число составов, которые могут быть приняты в депо.

Приведённая на рис. 2 схема иллюстрирует влияние изменения парности на организацию работы линии. На схеме горизонтальной цепью блоков изображена последовательность процессов организации работы линии метрополитена в рабочие дни. Штриховкой отмечены переходные процессы, без штриховки — установившиеся процессы. Из схемы видно, что изменение парности оказывает существенное влияние на состояние установившихся процессов, происходящих на линии.

Как было отмечено ранее, ПГД обладает свойством зеркальной симметрии относительно дневного часа «непик» [5], в связи с чем, изменение парности в утренние часы сказывается на парности в вечерние часы и наоборот.

Галочкой на рисунке отмечены благоприятные исходы при изменении парности, а знаком привлечения внимания (восклицательный знак в треугольнике) — неблагоприятные исходы.



Рис. 2. Схема влияния изменения парности на состояние графика

Перейдём к рассмотрению возможных исходов при увеличении и уменьшении парности утреннего фрагмента графика. Благоприятным исходом при увеличении парности является увеличение количества указателей на линии, которое ограничивается возможностями проведения осмотров составов, ночевавших на линии, и путевых работ.

С уменьшением парности ситуация улучшается, при этом необходимо меньше составов выводить из депо во время переходного процесса.

Неблагоприятной ситуацией является случай, когда приходится задействовать меньшее количество точек ночной расстановки на линии, это требует большей ёмкости депо или дополнительного депо.

При выборе местоположения точек ночной расстановки на линии необходимо учитывать равномерность их расположения. Если условие равномерности расположения не выполняется, пассажиры, находящиеся на наиболее удалённой от депо или точек ночной расстановки станции, будут ожидать поезда довольно

долго, а это противоречит принятому подходу к обеспечению удобства пассажиров.

В связи с этим необходимо предусматривать проверку условий реализуемости при установленном ограничении на количество вводимых составов из депо с выставленным приоритетом ввода составов на линию от указателей.

В настоящее время для построения ПГД на Московском метрополитене используется автоматизированная система построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена (АСП ПГД ППМ). Проверка рассмотренных условий реализуемости и реализации внедрена в данную систему в качестве отдельных блоков, представляющих собой функции и процедуры АСП ПГД ППМ. При создании графика они позволяют исключить заведомо нереализуемые варианты, что приводит к сокращению машинного времени, необходимого для построения. Это, в свою очередь, позволяет достигать эффективности и безошибочности построения процессов ПГД. 

## Литература

1. Баранов Л.А., Жербина А.И. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена // Вестник ВНИИЖТа, 1981, №2. —С. 17-20.
2. Феофилов А.Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. 1991, № 7. —С. 10-13.
3. Василенко М.Н., Дегтярев Д.П., Максименко О.А. Проблемы визуального анализа графика движения поездов на метрополитене и методы их решения // Неделя науки-2002. —СПб.: ПГУПС, 2002.
4. Сидоренко В.Г. Автоматизация построения планового графика движения поездов метрополитена // Автоматизация и современные технологии, 2003, №2. —С. 6-10.
5. Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Синтез сценариев построения планового графика движения пассажирских поездов Кольцевой линии метрополитена // Проблемы регионального и муниципального управления: Сборник докладов международной научной конференции, 2010. —С. 166-170.
6. Сидоренко В.Г., Новикова М.В. Синтез планового графика движения зонного типа // Мир транспорта. 2009, № 4. —С. 128-134.
7. Сидоренко В.Г., Пискунов А.С. Процедуры организации ночной расстановки составов на линии метрополитена // ВЕСТНИК МИИТа, 2008, Вып. 18. —М.: МИИТ. —С. 3-7.