

Построение планового графика движения для метрополитена



Валентина СИДОРЕНКО
Valentina G.SIDORENKO

Антон САФРОНОВ
Anthon I.SAFRONOV



Сидоренко Валентина Геннадьевна – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Сафронов Антон Игоревич – аспирант кафедры «Управление и информатика в технических системах» МИИТ.

Методика автоматизированного построения планового графика движения поездов метрополитена. Особенности линий, критерии оптимальности, уровни равномерности.

Ключевые слова: метрополитен, плановый график, критерии оптимальности, уровни равномерности, автоматизированное построение.

Scheduling of Metro Traffic

Sidorenko, Valentina G. – D.Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Safronov, Anthon I. – Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors propose algorithms of automated scheduling of traffic for metro trains and analyze features of specific lines, criteria of optimality, and levels of uniformity.

Key words: metro, planned scheduling, criteria of optimality, levels of uniformity, automated scheduling.

В крупных городах со времён появления первых видов общественного транспорта возникла проблема правильной организации его работы. Не стал исключением и метрополитен, для которого в общем виде задача автоматизированного построения планового графика движения (ПГД) формулируется привычным образом: разработать алгоритмы, подготовить оптимальный по критериям равномерности график с учётом специфических параметров и ограничений, определяемых порядком оборота подвижного состава и работы локомотивных бригад.

I.

Для начала рассмотрим два критерия равномерности:

а) критерий равномерности интервалов при отправлении поездов со станций R_I ;

б) критерий равномерности расположения вводимых/снимаемых составов R_N .

Автоматизированное построение ПГД распадается на ряд частных задач, в каждой из которых для определения оптимального решения используется только один из заявленных критериев.

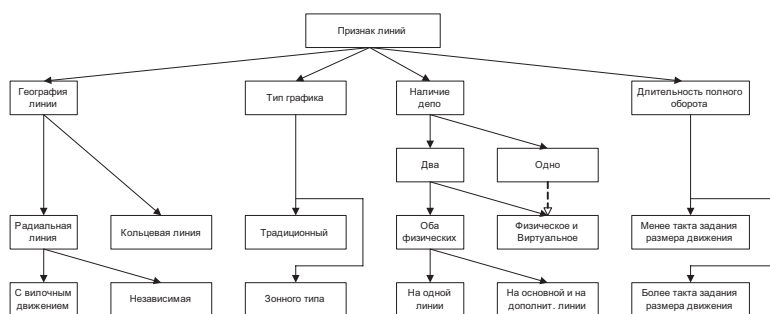


Рис. 1. Схема множества значений классификационных признаков.

Для введения критериев равномерности и постановки задачи используем формализацию [1], учитывающую возможность изменения количества составов на линии и показавшую свою обоснованность для описания ПГД. Каждый из объектов линии описывается упорядоченной последовательностью компонентов, которые определяют характеристики объекта и задают его связи с другими объектами. При этом используются понятия:

— «нитка» графика \mathbf{n} — последовательность, компоненты которой описывают движение маршрута от момента выхода на главный путь до момента ухода с него (соответствующая информация содержится в массиве элементов расписания M_e) с указанием типов маневровых передвижений в начале и конце движения по главному пути, переходы маршрута с одной нитки графика на другую и порядок следования ниток графика по одному главному пути;

— элемент расписания — последовательность, компоненты которой описывают движение маршрута от станции до следующей за ней; оно может осуществляться как по главному пути (перегону), так и станционным путям (тупикам).

С учетом выбранного способа формализации критерий равномерности интервалов при отправлении поездов со станций R_i определяется следующим образом:

$$R_i = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{s=1}^{N_i} (f_{NPS}(\mathbf{n}_i, 1, \mathbf{s}_s, True) \cdot M_e(\mathbf{s}_s) \cdot t_{omnp} - \mathbf{n}_i \cdot M_e(\mathbf{s}_s) \cdot t_{omnp})^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где \mathbf{n}_i — i -я нитка графика, $i = 1, 2, \dots, N_p$; N_p — количество учитываемых ниток, которое на единицу больше максимального количества составов на линии

в рассматриваемый промежуток времени;

\mathbf{n}_1 — первая в рассматриваемой последовательности нитка;

\mathbf{n}_{N_p} — последняя в рассматриваемой последовательности нитка; по ней будет двигаться маршрут нитки \mathbf{n}_1 после совершения полного оборота. Для радиальной линии это нитка $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_{nn} \cdot \mathbf{n}_{nn}$, где \mathbf{n}_{nn} — компонент последовательности нитка \mathbf{n} — следующая нитка к нитке \mathbf{n} , то есть нитка, по которой маршрут будет двигаться после окончания движения по нитке \mathbf{n} (после оборота). Для кольцевой линии это нитка $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_{nn}$;

N_s — количество станций на линии;

$M_e(\mathbf{s}_s)$ — элемент массива элементов расписания, начинающийся на станции \mathbf{s}_s ;

$M_e(\mathbf{s}_s) \cdot t_{omnp}$ — время отправления со станции \mathbf{s}_s ;

$f_{NPS}(\mathbf{n}_i, k, \mathbf{s}_s, True)$ — операция, в результате выполнения которой определяется k -й следующий поезд (в формуле (1) $k = 1$) после нитки \mathbf{n}_i при отправлении со станции \mathbf{s}_s .

Приведенная числовая характеристика достигает своего минимума при равномерном расположении всех рассматриваемых ниток на всех станциях. Введенный критерий аналогичен критериям, сформулированным в [2, 3].

Критерий равномерности расположения вводимых/снимаемых составов R_N формализуется указанным способом (2), где $M_{вв(сн)}$ — множество вводимых/снимаемых составов, которое включает в себя нитки, которые выбираются из последовательности ниток, определенной для вычисления критерия равномерности интервалов при отправлении поездов со станций R_i по признаку отсутствия предыдущей нитки при вводе составов или следующей нитки при снятии составов;





$$R_N = \sum_{i=1}^{N_{\text{вс}}(cn)} FCN(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_{i+1})^2 + \begin{cases} FCN(\mathbf{n}_{N_{\text{вс}}(cn)}, \mathbf{n}_{pp}, \mathbf{n}_1)^2, & \text{для случая ввода составов} \\ FCN(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_{pp}, \mathbf{n}_{N_{\text{вс}}(cn)})^2, & \text{для случая снятия составов} \end{cases} \rightarrow \min$$

$$\mathbf{n}_i \in M_{\text{вс}}(cn), \text{ если } \begin{cases} \mathbf{n}_i, \mathbf{n}_{pp} \in \emptyset, & \text{для случая ввода составов} \\ \mathbf{n}_i, \mathbf{n}_{pp} \in \emptyset, & \text{для случая снятия составов} \end{cases} \quad (2)$$

$N_{\text{вс}}(cn)$ — количество «ниток» множества $M_{\text{вс}}(cn)$;

$\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_{pp}$ — компонент последовательности «нитка \mathbf{n} — предыдущая нитка к нитке \mathbf{n} », то есть нитка, по которой маршрут двигался до начала движения по нитке \mathbf{n} (до оборота);

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

Введенные формализации критериев равномерности позволяют определить их значения для каждого пути отдельно.

II.

Решению задач автоматизированного построения ПГД посвящено значительное число работ, основными среди которых являются [1, 3-5]. Для каждой линии метрополитена строится свой ПГД. На вид графиков влияют особенности линий (рис. 1). Рассмотрим различные признаки линий метрополитена.

Под географией линии будем понимать ее конструктивное расположение в пространстве. По этому признаку линии делятся на радиальные и кольцевые. И у них есть ряд особенностей.

Порядка 93% ниток графика кольцевой линии метрополитена соответствует движению поездов по одному пути. Переход с одного пути на другой реализуется в настоящее время достаточно редко: только в связи с необходимостью специфической ночной расстановки составов. Отсюда можно сделать вывод, что на значительном временном интервале первый и второй пути рассматриваются как независимые [6].

Составление графика для радиальной линии имеет ту особенность, что построение ниток графика по первому и второму пути идет через конечные станции (станции оборота составов). Поэтому планирование должно осуществляться с учётом жёсткой связи ниток по обоим путям.

Способ построения ПГД радиальных линий с оборотом по конечным станциям (традиционный способ) изложен в [1, 3]. Вместе с тем оборот составов по промежуточным станциям следует реализовывать в случае нехватки ресурсов линии (пропускной способности конечных станций, единиц электроподвижного состава) для обеспечения заданной парности движения на всем протяжении линии или в связи с резким изменением пассажиропотока, что соответствует организации зонного движения. Построение графиков зонного движения изложено в [7].

Среди множества радиальных выделим линии с «вилочным» движением. Таковым будем называть движение составов по различным путям после проследования станции разветвления. Станция разветвления — это та, путь до которой для всех составов линии не различается, а после — для части составов различен. Такая организация движения оказывает влияние на вид ПГД [5].

Способ построения графика зависит от расположения и количества депо на линии. На коротких линиях, как правило, имеется одно депо. Существен при этом как для кольцевой, так и радиальной линии выбор пути, на который выходят составы из депо. Для линий с одним физическим депо, выдающим составы на разные пути, авторами введено понятие «виртуального» депо, дополняющего на графике физическое [6]. На длинных линиях предусматриваются два депо, за каждым закреплены свои составы. Два депо чаще всего располагаются на одной линии, но имеются случаи, когда одно из двух депо находится на другой линии.

Исходные данные для построения ПГД на Московском метрополитене поступают в форме массива тактов задания размера движения, где совокупность параметров каждого из элементов массива (парность, количество составов и так далее) задаётся на один астрономический час.

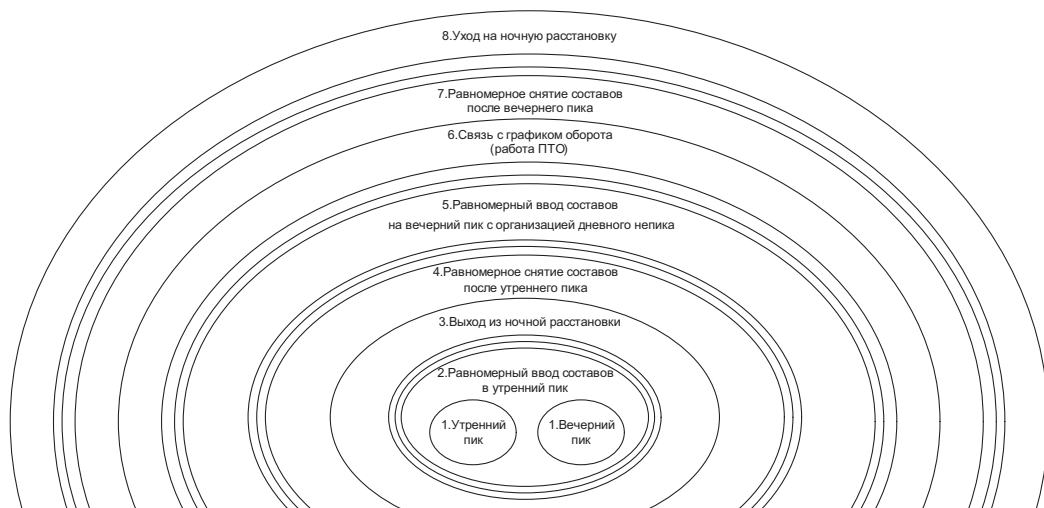


Рис. 2. Схема процедуры автоматизированного построения ПГД.

При построении графика движения существенным является соотношение времени полного оборота состава ($T_{по}$) с тактом задания размера движения (T_T). Это связано с тем, что при $T_{по} > T_T$ переход от одной парности к другой включает в себе снятие необходимого числа составов за T_T . В ином случае при $T_T > T_{по}$, переходный процесс ввода/снятия приходится реализовывать за несколько $T_{по}$.

Исторически сложилось, что создание алгоритмов автоматизированного построения ПГД начиналось с разработок для радиальных линий, выступавших как кольцевые [4]. В дальнейшем рассматривалось решение частных задач. То есть учёт особенностей линий требует своего развития. Актуальным остается и обобщение всего накопленного опыта в рамках единого подхода к построению ПГД.

III.

Процессы, происходящие на линии, можно разделить на переходные (динамические) и установившиеся (стационарные). В соответствии с технологией работы метрополитена имеется и задана определённая последовательность этих процессов.

Установившимся будем называть процесс, при котором парность остается постоянной в течение времени, большего времени полного оборота состава. Такая парность характерна для метрополитена в часы «пик» и «непик» движения, а также в период ночной расстановки составов. Установившиеся процессы соединяются переходными процессами, которые изме-

няют парность движения. Построение установившихся процессов при заданных размерах движения алгоритмируется достаточно просто [1]. Наибольшую сложность представляет переход от одного установившегося процесса к другому. Переходный процесс должен быть построен таким образом, чтобы к заданному моменту времени создать все условия для работы в стационарном режиме.

В соответствии с технологией ПГД в рабочие дни описывает следующие процессы:

1. Выход составов из ночной расстановки (переходный процесс).
2. Движение поездов с заданной парностью в утренний час «пик» (установившийся процесс).
3. Движение поездов между утренним часом «пик» и движением в непииковое время (переходный процесс).
4. Движение в непииковое время (установившийся процесс).
5. Организация перехода к вечернему часу «пик» (переходный процесс);
6. Движение поездов с заданной парностью в вечерний час «пик» (установившийся процесс).
7. Переход от вечернего часа «пик» к непииковому движению (переходный процесс).
8. Организация перехода от непиикового движения к ночной расстановке (переходный процесс).

В ряде случаев возможно изменение последовательности указанных 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. Причем отметим независимость от частностей общую особенность: любые процессы, происходящие на линии, связаны между собой, и изменения в одном из них могут сказаться на других.

Оптимальный с точки зрения критерия равномерности выбор ПГД требует перебора огромного количества вариантов [8]. Поэтому надо создать такую процедуру автоматизированного построения графика, которая бы предусматривала возможность проверки условий реализации запланированного до момента прохождения всех процессов и исключения из рассмотрения неперспективных вариантов на более ранних стадиях. В связи с этим авторами предусмотрена *рекурсивная* процедура автоматизированного построения ПГД (рис. 2), которая предлагает решение задачи методом направленного перебора с использованием схемы ветвей и границ.

Процессы, для которых характерен последовательный вызов одинаковых процедур, где результаты одной процедуры являются входными данными для следующей, изображены на схеме тремя близко расположенными кольцами (в этом случае продолжительность переходного процесса больше, чем время полного оборота составов). Цифрами на рисунке обозначен приоритетный порядок процессов. Автоматизированное построение ПГД рационально проводить с одного из установившихся процессов, так как в них движение поездов реализуется с постоянной парностью и автоматически отвечает критерию равномерности интервалов при отправлении поездов со станций. Наивысший приоритет авторами установлен для часа «пик», поскольку в нём наиболее жесткие требования, определяемые самой высокой парностью движения.

Рассматриваемая процедура построения ПГД предусматривает проведение расчётов с использованием компьютеров как предыдущего поколения на базе одноядерных процессоров, так и современных — на базе многоядерных процессоров. Преимущество последних — возможность параллельных вычислений. Таким образом, некоторые процессы построения ПГД могут выполняться синхронно: например, утренний и вечерний часы «пик» и соседс-

твующие с ними процессы ввода/снятия составов утром и ввода вечером. По этой причине утренний и вечерний часы «пик» (рис. 2) изображены как два ядра, соответствующие двум ядрам современных процессоров. Параллельно могут также проводиться расчеты для одного и того же процесса, но при разных начальных условиях.

IV.

Далее рассмотрим важную особенность ПГД, которая позволяет существенно упростить алгоритмизацию построения процессов ПГД. Плановый график линии, построенный на целый день, обладает свойством зеркальной симметрии (рис. 3). Согласно ему равномерное снятие составов в прямом времени соответствует равномерному вводу в обратном времени и наоборот. При переходе от общего вида графика к отдельным процессам построения можно выделить три уровня зеркальной симметрии:

- относительно центра отрезка времени, на котором осуществляется движение с минимальной парностью;
- относительно центра отрезка времени, на котором осуществляется движение с максимальной парностью для каждой из ранее выделенных частей;
- зеркальную симметрию расстановки составов у заданных указателей ночной расстановки вечером и выходом составов от указателей ночной расстановки утром [9].

Наличие зеркальной симметрии позволяет рассматривать лишь отдельно взятый процесс, а построение симметричного ему процесса проводить аналогично, используя зеркальные операции.

Перейдём к подробному рассмотрению каждого из процессов создания ПГД в соответствии с их приоритетом.

Построение процесса утреннего и вечернего часа «пик» проводится в прямом времени. Независимо от типа линии следует осуществлять ввод пользователем общего числа составов, обслуживающих линию в час «пик». Одновременно для радиальной линии предусматривается ввод длительностей оборотов по конечным станциям, а для кольцевой линии — количества составов, обслуживающих отдельно первый и второй путь. Гибкость построения данного процесса может при-

существовать в том случае, если время полного оборота составов не делится на интервал движения составов (в этом случае варьируются интервалы).

Следующий процесс связан с переходом к утреннему часу «пик». В этом процессе изменение интервала движения реализуется путём ввода дополнительных поездов из депо, которое выполняется с целью минимизации критерия равномерности расположения вводимых/снимаемых составов при изменении парности движения. Для радиальных линий также необходимо выполнение заданной длительности станционных оборотов составов на конечных станциях, которая зависит от числа маневровых бригад, задействованных в реализации оборотов. При изменении числа маневровых бригад накладывается ограничение на интервал между поездами по прибытии на станцию оборота, что при заданном интервале при отправлении с этой станции требует ввода составов [10]. Построение графика в ходе этого процесса реализуется в обратном времени.

Процесс выхода составов из ночной расстановки проводится в прямом времени и должен обеспечивать интервал между открытием станции и появлением на ней первого поезда в каждом из обоих направлений, не превышающий заданную величину. В том случае, если это требование не выполняется, следует вернуться к предыдущему процессу и изменить порядок выдачи составов из депо, либо ввести станционные обороты на промежуточных станциях. В ходе процесса выхода составов из ночной расстановки необходимо контролировать соответствие количества вводимых составов количеству незанятых указателей ночной расстановки.

Процесс выхода из утреннего часа «пик» проводится в прямом времени при следующих условиях:

- число снимаемых составов для каждого из главных путей определяется в отдельности;
- оптимальные по критерию равномерности расположения вводимых/снимаемых составов варианты снятия составов и назначения маршрутов на нитки определяются в зависимости от заданных графиком оборота подвижного состава ремонтов и осмотров;
- рассогласования межпоездных интервалов устраняются согласно крите-

рию равномерности интервалов при отправлении поездов со станций (на каждой станции для текущей нитки рассчитывается «расстояние по времени» до соседних ниток справа и слева, затем полученное рассогласование компенсируется путём ввода сверхрежимной выдержки на станции) [2, 11].

Пользуясь свойством симметрии процессов ПГД, отметим, что следующие три процесса строятся по схемам, аналогичным упомянутым ранее:

- процесс входа в вечерний час «пик» не обладает какими-либо характерными особенностями, поэтому построение сетки графика проводится зеркально построению сетки в процессе выхода из утреннего часа «пик»;
- процесс построения вечернего часа «пик» проводится аналогично построению процесса утреннего часа «пик» с учётом работы пунктов технического обслуживания (ПТО);
- процесс построения выхода из вечернего часа «пик» проводится аналогично построению сетки в процессе выхода из утреннего часа «пик».

По ходу движения в дневные часы «непик» построение сетки ПГД идет аналогично построению сетки в процессе часа «пик». Независимо от типа линии важно учесть тот факт, что в это время бывают осмотры составов, которые предполагают «размен» составов через депо или линейные ПТО. Алгоритмы, соответствующие процедурам построения этого процесса ПГД, должны учитывать специфику организации маневровых передвижений согласно графику оборота составов.

Процесс ухода на ночную расстановку строится в прямом времени, при этом для обеспечения правильного расположения составов у указателей ночной расстановки проводятся следующие операции [8]:

- вводятся регулировочные отстои на станционных путях;
- осуществляются обороты по промежуточным станциям после завершения движения пассажирских поездов.
- корректируется в рамках заданных ограничений график оборота подвижного состава (меняются время и место проведения осмотров и ремонта составов);



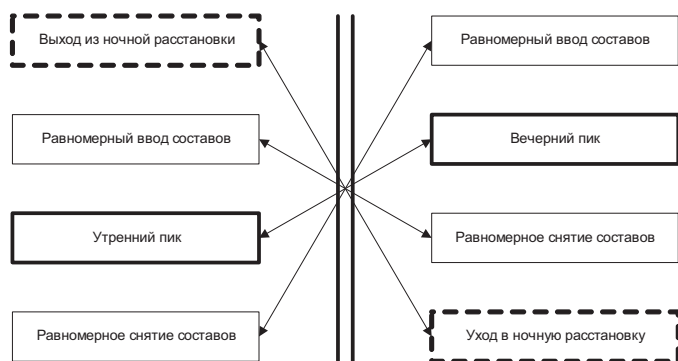


Рис. 3. Зеркальная симметрия процессов построения ПГД.

— корректируются в рамках заданных ограничений режимы работы депо (в случае необходимости изменяются времена снятия и подачи напряжения на контактных рельсах соединительных веток депо в период дневного часа «непик»).

V.

Согласно выбранным критериям признаком качества построения ПГД является равномерность, которая имеет несколько аспектов рассмотрения (рис. 4):

- равномерность интервалов при отправлении поездов со станций;
- равномерность ввода/снятия составов за время их полного оборота на линии по каждому из путей;
- равномерность ввода/снятия составов за время полного оборота состава на линии в целом;
- равномерность ввода/снятия составов за время, равное нескольким их полным оборотам на линии в целом.

Каждый следующий аспект равномерности является «внешним», то есть более общим по отношению к предыдущему.

В результате изучения ПГД установлено, что переход между двумя установившимися процессами с различной парностью не обладает высокой частотой снятия. Это определяется следующими факторами:

- постепенным изменением пассажиропотока;
- ограничениями на время незанятости платформы на промежуточных станциях, определяемыми правилами обслуживания пассажиров;
- организацией работы систем маршрутно-релейной централизации

и обеспечения безопасности движения для выполнения маневровых передвижений составов на линии и депо.

В общем случае процесс равномерного снятия составов может быть описан следующим алгоритмом:

1. Из всего множества M составов на линии выбирается множество равномерно расположенных составов M_{Σ} , количество элементов множества M_{Σ} равно суммарному количеству снимаемых составов за весь переходный процесс.

2. При выполнении i -го снятия из множества равномерно расположенных составов M_{Σ} выбираются $M_{\text{вс}(ch)_i}$ равномерно расположенных составов, подлежащих снятию.

3. Если снятие производится по двум путям, то из множества $M_{\text{вс}(ch)_i}$ выбирают равномерно расположенные составы, подлежащие снятию по каждому из главных путей в заданном пользователем количестве.

4. После выполнения снятия из множества M_{Σ} исключаются элементы множества M_i :

$$M_{\Sigma} = M_{\Sigma} \setminus M_{\text{вс}(ch)_i} = M_{\Sigma} \cap \overline{M_{\text{вс}(ch)_i}}.$$

5. Если выполнены не все снятия, то происходит переход к пункту 2.

6. Если все снятия выполнены, выполняется выравнивание межпоездных интервалов по критерию равномерности интервалов при отправлении поездов со станций R_l .

В основе выбора равномерно расположенных вводимых/снимаемых составов лежит алгоритм поиска наибольшего общего делителя (НОД) двух чисел, базирующийся на алгоритме деления Евклида [12-14]. В качестве этих чисел в рассматриваемом случае принимаются количество составов

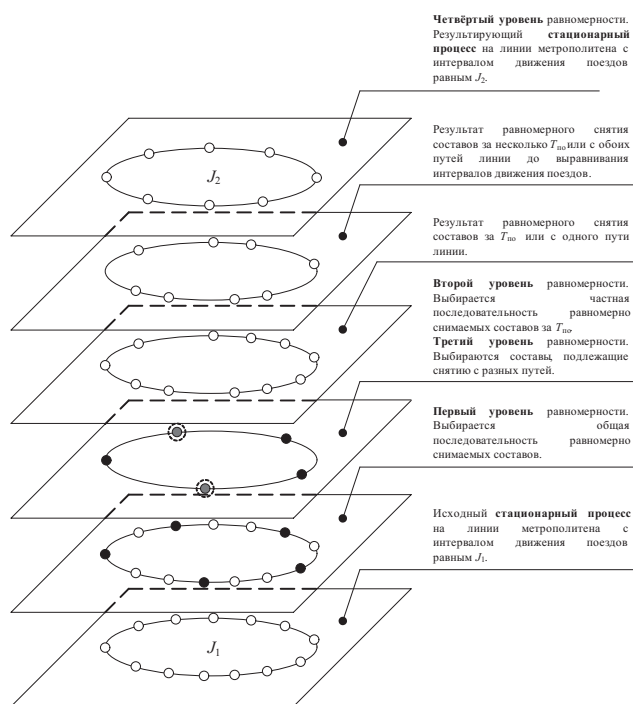


Рис. 4. Уровни равномерности при построении ПГД.

в исходном установившемся процессе и количество составов, заданное для следующего установившегося процесса.

После окончания ввода/снятия составов продолжительность переходного процесса, который заключается в выравнивании интервалов между поездами, не превосходит времени полного оборота [14].

Согласно изложенным принципам авторами были разработаны алгоритмы построения ПГД для линий разной географии. Они реализованы в автоматизированной системе построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоренко В.Г. Автоматизация построения планового графика движения поездов метрополитена // Автоматизация и современные технологии. — 2003. — № 2.
2. Сеславин А.И., Воробьева Л.Н. Градиентный способ централизованного управления городскими транспортными системами // Наука и техника транспорта. — 2004. — № 4.
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. Баранов Л.А., Жербина А.И. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. — 1981. — № 2.

5. Феофилов А.Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. — 1991. № 7.

6. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Применение критерия равномерности в больших транспортных системах // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XVII международной конференции. — М., 2009 г.

7. Сидоренко В.Г., Новикова М.В. Синтез планового графика движения зонного типа // Мир транспорта. — 2009. — № 4.

8. Сидоренко В.Г., Пискунов А.С. Процедуры организации ночной расстановки составов на линии метрополитена // Вестник МИИТ. — 2008. Вып. 18.

9. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Синтез сценариев построения планового графика движения пассажирских поездов Кольцевой линии метрополитена // Проблемы регионального и муниципального управления. Сборник докладов международной научной конференции. — М., 2010.

10. Сидоренко В.Г., Власова И.А., Рындина Е.Ю. Подсистема автоматизированного построения выхода составов метрополитена из расстановки на ночь // Неделя науки-2008. — М.: МИИТ. 2008.

11. Сидоренко В.Г., Рындина Е.Ю. Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена // Вестник МИИТ. — М.: МИИТ. 2008. — Вып. 18.

12. Концевич М.Л. Равномерные расположения // Квант. — 1987. — № 7.

13. Виноградов И.М. Основы теории чисел. — М.: Наука, 1972.

14. Сеславин А.И., Сеславина Е.А. Принципы равномерности в задачах управления потоками пассажирского транспорта // Прикладная информатика. — 2009. — № 2.

Координаты авторов (contact information):
Сидоренко В.Г. — valenfalk@mail.ru,
Сафронов А.И. — flash.a@mail.ru.

