

Методика составления расписания движения поездов для столичного метрополитена

ЛОГИНОВА Людмила Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры¹; e-mail: ludmilanv@mail.ru

СЕСЛАВИНА Елена Александровна — канд. экон. наук, доцент кафедры²; e-mail: seslavina@mail.ru

СЕСЛАВИН Андрей Игоревич — старший преподаватель кафедры¹; e-mail: aiseslavin@gmail.com

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва

² Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Информационные системы цифровой экономики», Москва

Расписание движения поездов по линии Московского метрополитена в настоящее время составляется высококвалифицированными графистами из аппарата диспетчеров метрополитена. Созданное расписание действует в течение многих дней как закон для машинистов метрополитена и учитывает переменность пассажиропотока по дням недели и часам суток. В настоящее время готовое расписание представляет собой многостраничный первичный документ, который имеет дополнения в виде графика оборота поездов и графика поездных бригад, которые состоят иногда из одного машиниста, а иногда дополняются помощником. Кроме того, существует расписание и для оборачивающих бригад машинистов. Эти бригады всякий раз проводят порожние поезда в тупиках линий в тоннелях, в то время как основная бригада может дойти на конечной станции от конца поезда к его голове, а иногда и немного отдохнуть. Кроме оборачивающих бригад имеются и сменные бригады, которые обеспечивают возможность перерыва на обед и отдыха основным бригадам в их каждодневной работе. Таким образом, существует совокупность расписаний, главным звеном которого является расписание движения поездов. Ввиду трудностей с составлением расписаний, которые в настоящее время преодолеваются методом проб и ошибок, в большинстве случаев отсутствуют возможности для создания многих вариантов расписаний для возможности последующего отбора, наиболее подходящего из них. Такой отбор может быть осуществлен со следующими целями: минимизация расходов электроэнергии в течение дня, повышение устойчивости расписания к постоянно действующим за сутки возмущениям типа малых сбоев из-за большого наплыва пассажиров на станции или из-за небольших нарушений безопасности движения. Перечисленную совокупность проблем можно преодолевать в случае существования центрального управления всеми поездами линии метрополитена с помощью вычислительной техники. В работе предложена методика составления расписания для поездов метрополитена на основе математического аппарата, который обеспечивает конечный расчет графика движения с учетом всех требований и ограничений. Особенностью разработанной методики является ее пригодность для дальнейшей реализации в виде программного продукта.

Ключевые слова: график движения поездов; метрополитен; математический аппарат; управление транспортными системами; ночная расстановка; равномерные интервалы; математическое моделирование; метод потенциалов; алгоритм Евклида.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-67-86

Введение

Метрополитен по праву называют одной из главных транспортных систем города Москвы. Ежедневно по линиям метрополитена проходит более десяти тысяч поездов, проезжает более 7 млн человек. Московский метрополитен занимает первое место в мире не только по интенсивности, но и по надежности и объемам перевозок [1].

Составление расписания движения поездов метрополитена крупного мегаполиса, которым

является Москва, представляет собой актуальную, но непростую проблему. При ее постановке вырабатывается целый комплекс требований и условий, необходимых для практического использования расписания. Составление расписания метрополитенов в различных городах зарубежных стран и России составляется аналогично принципам и методам, применяемым при составлении расписания движения поездов на железных дорогах. Сначала составляется график движения поездов на железнодорожной

линии во времени. Составление такого графика использует эвристический и графический алгоритмы. В мегаполисах Китая, Индии и Японии, а также США и Бразилии в ряде случаев учитывают высокие скорости движения поездов, а также значительную протяженность каждой конкретной линии, что влияет на время хода поезда на концах этих линий. Такая особенность также характерна для крупных европейских столиц.

Проблемами составления расписания движения рельсового транспорта занимаются ученые и в России, и за рубежом. Ряд работ российских ученых посвящен составлению расписания железных дорог и метрополитена [2–7]. В работе [2] рассматривается проблема составления оптимального расписания движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой с разъездом. Вопросы построения искусственной нейронной сети для формирования расписания, а также ее применения в системе поддержки принятия решения при оперативном управлении движением поездов рассмотрены в работах [3, 4]. Методы автоматизации при составлении расписания для метрополитена рассмотрены в работах [5, 6]. Работа [7] посвящена методике построения графика движения поездов на основе многокритериального принятия решений.

Особое внимание вопросам составления, совершенствования и интеграции расписания движения поездов уделяется и зарубежными учеными [8–17]. В работе [8] проанализирована структура 33-х метрополитенов, на основе сделанных выводов автор предлагает приложение для проверки надежности метрополитена. Авторы работ [9–13] рассматривают вопросы составления надежного расписания движения поездов, снижения общего энергопотребления за счет выбора скорости движения и максимального использования энергии рекуперативного торможения. В работе [14] рассмотрен метод оптимизации для изменения расписания в период окончания работы пекинского метрополитена, авторами проведены численные эксперименты при минимизации отклонения отправления поездов метрополитена на основе реальных случаев. Работа [15]

посвящена выявлению преимуществ и недостатков современных методов построения графиков движения поездов железнодорожных систем. Анализ способов устранения сбойных ситуаций при корректировке расписания в Австрии, Бельгии, Дании, Германии и Нидерландах проведен в работе [16]. Объединяя три цели для составления расписания: удовлетворенность пассажиров, эксплуатационные расходы и отклонение от расписания, исследование в работе [17] фокусируется на проблеме изменения графика движения части железных дорог Голландии в случае больших сбоев.

Целью составления расписания является обеспечение ритмичности функционирования метрополитена, что создает условия высокого уровня безопасности и удобства для пассажиров и исполнения технологических норм и правил организации движения как на линиях метрополитена, так и в депо. Это достигается созданием равномерного графика движения поездов. В отличие от классических графических методов составления расписания, в статье предлагается использование аналитического подхода, основанного на применении математических методов теории чисел, теории потенциалов и методов решения нестандартных задач целочисленного программирования. Такой подход, реализованный с помощью ЭВМ, позволяет оперативно не только составлять, но и корректировать расписание движения поездов линий метрополитена.

1. Основные требования к графику движения поездов метрополитена

Сформулируем основные требования к графику движения поездов, которые учитываются алгоритмом компьютерной программы. Следует сразу указать на то, что создание универсальной программы для всех видов линий метрополитена и всех видов организации движения на ней невозможно из-за различных возможностей депо, вместимости и нахождения мест ночной стоянки, объемов пассажиропотоков, различий условий в рабочие и выходные дни и иных особенностей линий. Из соображений равномерности потока поездов и требований к ритмичности движения и устойчивости расписания к возможным помехам движению,

вызываемым случайными обстоятельствами, желательно иметь движение с постоянным интервалом между поездами. Однако оно практически невозможно из-за непостоянства пассажиропотока в течение суток. Поэтому желательно иметь движение поездов с постоянным интервалом только на отдельных этапах дневного графика.

Основные требования к расписанию следуют из объема пассажиропотока, который меняется в течение дня. В часы пик, которые происходят два раза в день, требуется иметь минимальный интервал и, соответственно, наибольшее число поездов на дистанции/линии. Зная максимальное число поездов, время движения поезда по каждому перегону и стандартное время остановки на каждой станции, можно найти интервал в часы пик. Время начала и окончания часа пик может быть указано исходя из времен возникновения и окончания утреннего и вечернего этапов с наибольшими дневными потоками, которые связаны с движением пассажиров на работу и с нее. Утренний час пик начинается менее чем через 2 часа после начала утреннего движения поездов. Время его начала также связано с началом утреннего максимума потока пассажиров. Поэтому первым этапом графика движения поездов является утренний ввод числа поездов с нуля до максимального их числа на линии в утренний час пик, но для такого расчета требуется знать места (точки) и объемы ночной расстановки поездов и систему их движения из депо.

Требование к организации утреннего выпуска поездов из депо

Во время ночного перерыва движения часть поездов находится в депо, другие поезда размещены на главных и вспомогательных путях на станциях с путевым развитием, где организован ночной отдых для машинистов. В депо имеются крытые помещения для стоянок поездов, из которых исходят многочисленные пути со стрелками. Эти пути ведут на дистанцию дневных маршрутов метрополитена. Для удобства и надежности выхода поездов из депо требуется повышенный интервал между ними, который должен быть не менее двойного интервала в часы пик. Следовательно, за один

оборот поездов по маршруту может оказаться невозможным выпуск всех поездов на линию. Однако в пределах двух оборотов все поезда должны быть выведены из депо согласно расписанию.

На части станций метрополитена с разветвленной рельсовой сетью имеется возможность ночного расположения поездов вне магистральных путей. Кроме того, часть поездов может находиться и на самих магистральных путях. Такое расположение имеет двоякую целесообразность. С одной стороны, не все поезда могут поместиться в депо, с другой стороны, желательно, чтобы уже в начале утреннего движения пассажир, пришедший на любую станцию, ожидал поезда не слишком долго. Это время может быть ограничено примерно четвертью часа. При такой организации ночной расстановки возникает начальная равномерность распределения по кольцевому движению на линии метрополитена, однако в каждом месте ночной расстановки может оказаться и более одного поезда. Поэтому, зная общее число поездов, можно варьировать их количество на каждом из пунктов ночной стоянки, соблюдая их сумму, равную указанному общему числу.

2. Основные принципы организации движения поездов по линии метрополитена

Сформулируем основные принципы организации движения поездов на линии метрополитена. Первым принципом является соблюдение рассчитанного или указанного интервала движения в часы пик. Также желательно соблюдать интервалы движения, не больше заданных в другие части дня, в которых пассажиропоток меняется слабо. Такие интервалы будем называть дневными режимами работы метрополитена. Промежутки между этими режимами являются переходными режимами, в которых пассажиропоток меняется плавно. Поэтому исходя из данных о переменном суточном пассажиропотоке можно найти продолжительности часов пик, дневных режимов и переходных режимов движения поездов на линии. Кроме того, могут быть рассчитаны постоянные интервалы движения в часы пик и во время дневных

режимов. В переходных режимах интервалы движения не постоянны, и для составления расписания требуется постановка и решение задачи о движении в эти периоды суток.

Существенным требованием к движению поездов является условие отсутствия более двух поездов на каждом из перегонов метрополитена в любой момент времени. Это требование связано с условием безопасности, которое заключается в том, что поезд с пассажирами не должен оказаться запертым в тоннеле, даже при остановке в нем поезда. Наиболее жестко это требование проявляется в часы пик с самыми малыми интервалами движения. Если в часы пик оно удовлетворяется, то при движении с меньшей интенсивностью и, соответственно, меньшим интервалом между поездами его легче соблюсти, а при правильной организации движения это условие может выполняться автоматически. При движении поездов по трассе автоматика не допускает опасного сближения поездов. График движения обязан учитывать это обстоятельство. В противоположном случае могут штатно происходить вынужденные остановки поездов с неудобствами для пассажиров и потерей электроэнергии на последующий разгон поезда. Требование движения с постоянным интервалом приводит к тому, что графики движения различных поездов на большей части маршрута повторяют один другого с временными сдвигами.

3. Общие методы математического моделирования движения поездов

Для разработки методики составления расписания движения поездов и дальнейшего создания программы составления общего графика движения необходимо иметь математический аппарат, который позволял бы обеспечить эффективный расчет графика движения с учетом всех требований и ограничений. Кроме того, желательно, чтобы этот же аппарат мог быстро устранять возможные отклонения от графика при реальном движении. В этом случае появляется возможность оперативного управления движением группы поездов на замкнутом маршруте. Для этого нужно использовать методы метрического пространства [18] для моделирования. Целесообразно ввести понятие расстояния между двумя пунктами на

линии, выраженное в единицах времени, считая, что эти пункты поезд может проходить с заданной скоростью. Будем считать такое математическое расстояние равным времени прохождения пути между пунктами (время движения поезда между станциями).

Для постановки задачи рассмотрим движение по замкнутому маршруту (линия метрополитена), который будем называть кольцевым. Допустим, что на кольцевом маршруте (далее — кольцо) отмечено положение n поездов $0 \leq x_1 < x_2 < \dots < x_n \leq S$. За ноль принята произвольная точка кольца. При этом будем считать, что невозможны ситуации, когда одно транспортное средство, отставая от другого, догонит и перегонит его на кольце. Длина всего кольца в единицах времени равна S . Поэтому интервал T равномерного движения находится из следующего соотношения:

$$T = \frac{S}{n}. \quad (1)$$

Введем и определим новое понятие — расстояния $d(x_i, x_j)$ между двумя поездами:

$$d(x_i, x_j) = x_j - x_i - (j - i)T, \text{ при } j > i. \quad (2)$$

Заметим, что расстояние, определенное формулой (2), показывает, что математическая модель представляет собой метрическое пространство, величина расстояния в котором не зависит от выбора начальной точки на кольце, потому что в формулу (1) входят разности координат точек на кольце. Если такое расстояние между двумя транспортными средствами равно нулю, то это означает, что между ними реальное расстояние пропорционально нужному количеству интервалов (1), а также равно разнице их номеров на маршруте. Зная положения всех транспортных средств на кольце, можно с помощью формулы (2) найти расстояния между членами их произвольной пары. Кроме того, можно ранжировать все транспортные средства и найти лидера и аутсайдера движения. Для этого введем понятие *потенциала положения транспортного средства на кольце* $f(x_i)$ следующим образом:

$$f(x_i) = x_i - iT. \quad (3)$$

Чем больше потенциал положения транспортного средства, тем сложнее его догнать отстающим. Наибольшим потенциалом обладает так называемый поезд-лидер, а при равенстве наибольших потенциалов у нескольких транспортных средств — лидеры. Наименьшим потенциалом обладает поезд-аутсайдер движения, или (если их несколько) аутсайдеры. Разность между потенциалом лидеров и потенциалом аутсайдеров будет называть максимальным расстоянием при заданном положении транспортных средств на кольце:

$$\Delta_{\max} = \max_i f(x_i) - \min_j f(x_j). \quad (4)$$

Это расстояние необязательно достигается между двумя рядом находящимися транспортными средствами. Если максимальное расстояние оказывается равным нулю, то это означает, что происходит движение поездов по кольцу с равными интервалами. И обратно, при движении с равными интервалами максимальное расстояние равно расстоянию между любыми двумя поездами и равно нулю. Поэтому для перехода от произвольного расположения поездов на кольце к их положению с равными интервалами необходимо свести все разности потенциалов к нулю. Наименьшее время такого перехода не определяется формулой (4). Такое время достижимо, если диспетчер отдаст команду «Стоять» лидеру, в то время пока аутсайдеры приближаются к нему, а правая часть формулы (4) не окажется равной нулю. Все остальные транспортные средства (ТС), еще ранее аутсайдеров, достигнув по формуле (4) лидера, должны прекратить движение. Они это могут сделать за время, меньшее Δ_{\max} из (4). При этом ТС могут достичь лидера и стоять или двигаться несколько медленнее и не останавливаться специально, что может сберечь энергетические ресурсы их движения. Таким образом, оптимально по быстродействию решается задача управления группой ТС на кольце в случае необходимости устранения их неравномерного положения.

Частными случаями для рассмотренной задачи являются ситуации, когда несколько поездов выбились из графика. Если эти поезда опережают график на известные времена, то

им следует подождать остальные поезда на ближайших станциях. Если же они отстают от графика, то им следует ехать с максимальными скоростями, а время стоянки поезда на станции должно принимать минимальное значение. В этот период остальные поезда должны подождать отставших на ближайших станциях. Таким образом, с помощью потенциалов вводится нормированное метрическое пространство в множестве расположений поездов на линии-кольце.

4. Методика снятия поездов и их возвращения на линию

При переходе от одного дневного режима к другому в [19] предложен расчетный способ, основанный на применении алгоритма Евклида. Доказано, что при применении этого способа перехода от движения с n поездами на кольце к m поездам время переходного режима Δ_{\max} вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta_{\max} = \frac{S(n - m - (n, m))}{n(n - m)}. \quad (5)$$

Доказано, что при использовании формулы (5) при изменении числа поездов на линии его время является наименьшим из возможных. Из формулы (5) можно получить полезную верхнюю оценку этого времени. Для этого достаточно отбросить в числителе наибольший общий делитель (n, m) натуральных чисел n и m и получить следующее неравенство:

$$\Delta_{\max} < \frac{S}{n}. \quad (6)$$

Для $n = 22$, $m = 18$, $S = 1$ час получим по формуле (5) $\Delta_{\max} = 1,36$ минуты, а по приближенной формуле (6) $\Delta_{\max} = 2,72$ минуты. Расчеты означают, что при выводе поездов с линии время перехода на новый режим меньше, чем начальный интервал их следования. Следует учесть, что этот интервал чрезвычайно мал. Поэтому переход к новому установившемуся режиму короток, что удобно и для пассажиров, и для управления поездами. При этом нужно учитывать, что поезда в метрополитене не уходят с линии мгновенно, а лишь после достижения возможности их следования непосредственно

в депо или на дополнительные станционные пути. Однако такое движение никак не мешает пассажирам и другим поездам.

Методика возвращения поездов при выводе поездов на линию (ввод поездов) обратен методике их вывода и отличается лишь тем, что дополнительные поезда должны попадать именно в середины интервалов, предварительно подготовленных для них с помощью алгоритма Евклида.

Для использования способа расчета с помощью алгоритма Евклида выработана расчетная схема вычисления двоичного кода ввода или вывода поездов. Каждая единица в коде ввода обозначает сбрасываемый поезд, а всякий ноль обозначает оставляемый поезд.

5. Методика утреннего ввода поездов в первый час пик

Задача расчета первого этапа дневного расписания поездов имеет самые жесткие условия. Они связаны прежде всего с тем, что время между началом утреннего движения и временем начала утреннего часа пик составляет менее двух часов, а за такой интервал на линию метрополитена должны быть выведены все поезда. Поэтому ввод поездов — длительный и интенсивный период. К тому же он не является стандартным, потому что начинается не после движения с равными интервалами, а после ночной расстановки поездов в депо и по дистанции. Составление математического алгоритма решения такой задачи не исключает некоторых переборов вариантов, которые можно осуществлять методом ветвей и границ с некоторой модификацией, связанной со сведением задачи к целочисленной и применением метода потенциалов, а также решением динамической задачи постепенного выхода поездов из депо. При этом нужно с самого начала не допускать большого увеличения размерности перебора вариантов расчета, максимально применяя методы теории чисел.

Следует отметить, что при решении такой задачи помогают условия начальной равномерности движения за счет ночной равномерной расстановки поездов на дистанции. Весь утренний ввод поездов целесообразно мысленно разбивать на два этапа:

- Первый этап — начинают движения поезда, стоящие на путях линии, и одновременно с началом их движения производится постепенный выпуск поездов из депо.
- На втором этапе производится только выпуск оставшихся в депо поездов, и этому уже не могут помешать поезда, которые размещались ранее на линии.

Основной принцип методики состоит в том, чтобы расстояние между поездами каждой их пары стало кратным интервалу движения в час пик. При полном соблюдении этого правила уже не может возникнуть задержка поездов с пассажирами на станциях.

6. Методика перехода к вечерней расстановке поездов

Данная методика схожа с методикой утреннего ввода, но происходит в более легких временных условиях, потому что от времени вечернего часа пик до окончательной остановки движения проходит примерно в два раза больше времени, чем утром при вводе поездов. Расчетная часть методики представляет собой следующие этапы: расчет мест и числа поездов ночной расстановки, утренний ввод поездов в час пик, час пик, первый вывод поездов из часа пик, движение с постоянным интервалом, второй вывод поездов, движение с постоянным интервалом, первый дневной ввод, движение с постоянным интервалом, первый ввод на вечерний час пик, первый вечерний вывод, движение с постоянным интервалом, второй вечерний вывод, движение с постоянным интервалом, переход к вечерней расстановке поездов.

Таким образом, методика составления дневного расписания движения поездов для метрополитена представляет собой последовательность расчетов, которые начинаются утренним вводом поездов (до часа пик), движением в утренний час пик, несколькими ступенями вывода поездов после утреннего часа пик, несколькими ступенями ввода поездов в вечерний час пик, движением во время вечернего часа пик, несколькими этапами вечернего вывода поездов и заканчиваются ночной расстановкой поездов. Расписание каждого из этапов рассчитывается с помощью метода

потенциалов. Переходы от одного равномерного движения к другому определяются с использованием алгоритма Евклида и нахождения двоичного кода ввода и вывода поездов. Вечерняя расстановка поездов и методики начала утреннего ввода поездов и конца вечернего движения рассчитываются с помощью методов решения целочисленных задач.

7. Разработка алгоритмического и программного обеспечения

Авторами было разработано алгоритмическое и программное обеспечение (АО и ПО соответственно), реализующее составление расписания утреннего ввода поездов для виртуальной линии метрополитена типа «кольцо» [20]. Для проведения тестирования АО и ПО использовались параметры движения виртуальной линии метрополитена:

- одно депо на линии;
- 12 станций на линии;
- три станции, содержащие пункты ночного отстоя поездов;
- время хода для каждого перегона дистанции (данные приведены в табл. 1 в столбце 2);
- время стоянок для каждой станции дистанции (данные приведены в табл. 1 в столбце 3);
- минимальный интервал = 91 с;
- начало движения: 05:30:00.

На рис. 1 представлено укрупненное АО решаемой задачи расчета расписания поездов линии метрополитена. В блоке 2 происходит задание параметров линии, в блоке 3 реализован метод потенциалов для определения лидеров станций, с которых будет осуществлен ввод поездов, т. е. определен порядок и рассчитаны потенциалы станций (мест ночного отстоя), с которых будет реализован выпуск поездов. В блоке 4 реализован выпуск поездов в виде расчета времени начала движения с мест ночного отстоя. В блоке 5 происходит корректировка расписания методом потенциалов [20]. Распечатка карт расписания соответствующих маршрутов реализована в блоке 6.

ПО реализовано с помощью интерактивной оболочки Jupyter Notebook, входящей в дистрибутив языка Python Anaconda. На рис.

Таблица 1. Параметры движения поездов по виртуальной линии метрополитена

Название станции	Время хода, сек	Время стоянки, сек
1	2	3
Станция 1	125	30
Станция 2	125	30
Станция 3	90	30
Станция 4	120	30
Станция 5	120	30
Станция 6	135	30
Станция 7	115	30
Станция 8	90	30
Станция 9	80	25
Станция 10	70	25
Станция 11	95	30
Станция 12	140	25

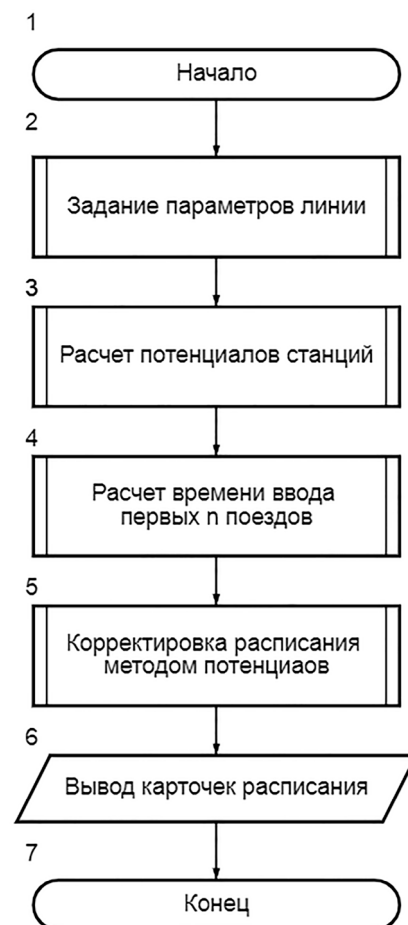


Рис. 1. Алгоритмическое обеспечение расчета расписания поездов метрополитена

```

In [55]: # Расчет потенциалов первых поездов на станциях утреннего ввода поездов
potential_lider = [0]
sum_time = 0
col_peregon = 0
for i in range(1,len(station)+1):
    if i <= 5:
        col_peregon +=1
        temp_station_curr = station.get(i)
        temp_station_next = station.get(i+1)
        sum_time =sum_time+ temp_station_curr[2]+temp_station_next[3]
        potential_lider.append(sum_time-(col_peregon)*int_pik )

sum_time = 0
col_peregon = 0
for i in range(1,len(station)+1):
    if i <= 11:
        col_peregon +=1
        temp_station_curr = station.get(i)
        temp_station_next = station.get(i+1)
        sum_time =sum_time+ temp_station_curr[2]+temp_station_next[3]
        potential_lider.append(sum_time-(col_peregon)*int_pik )
print(potential_lider)
print("Потенциалы первых трех станций, которые выпускают поезда из отстоя:")
print("Потенциал станции 1 = {}".format(potential_lider[0]))
print("Потенциал станции 2 = {}".format(potential_lider[1]))
print("Потенциал станции 3 = {}".format(potential_lider[2]))

[0, 285, 494]
Потенциалы первых трех станций, которые выпускают поезда из отстоя:
Потенциал станции 1 = 0
Потенциал станции 2 = 285
Потенциал станции 3 = 494
    
```

Рис. 2. Фрагмент расчета потенциалов поездов, выходящих из точек ночного отстоя

П № 10 .	Время хода 1650 сек.	Интервал : 91 се	П № 1 .	Время хода 1650 сек.	Интервал : 91 сек
'Станция 1 ' :	0:00:00		'Станция 1 ' :	5:32:35	
'Станция 2 ' :	0:00:00		'Станция 2 ' :	5:34:35	
'Станция 3 ' :	0:00:00		'Станция 3 ' :	5:37:05	
'Станция 4 ' :	0:00:00		'Станция 4 ' :	5:39:35	
'Станция 5 ' :	0:00:00		'Станция 5 ' :	5:42:20	
'Станция 6 ' :	0:00:00		'Станция 6 ' :	5:44:45	
'Станция 7 ' :	0:00:00		'Станция 7 ' :	5:46:45	
'Станция 8 ' :	0:00:00		'Станция 8 ' :	5:48:30	
'Станция 9 ' :	0:00:00		'Станция 9 ' :	5:50:05	
'Станция 10 ' :	5:41:16		'Станция 10 ' :	5:52:10	
'Станция 11 ' :	5:43:51		'Станция 11 ' :	5:54:55	
'Станция 12 ' :	5:46:26		'Станция 12 ' :	5:57:30	

Рис. 3. Фрагмент расписания поезда, выходящего из места ночного отстоя

2 представлен фрагмент ПО для реализации блока 2 общего алгоритмического обеспечения.

В результате работы ПО получено расписание поездов в утренний час пик в виде листов расписания (см. рис. 3), на которых представлено время отправления поезда со станций виртуальной линии.

Заключение

В работе предложена методика составления расписания для поездов метрополитена на основе математического аппарата, который обеспечивает конечный расчет графика движения с учетом всех требований и ограничений. Особенностью разработанной методики является ее

пригодность для дальнейшей реализации в виде программного продукта. При этом возникает возможность ее применения на практике в локомотивных депо, обслуживающих метрополитен, где достигается оперативность разработки графика движения, внесения необходимых корректировок, обеспечивающих весь процесс управления всеми поездами линии в реальном времени. В методике учтены все многочисленные требования и ограничения к создаваемому графику движения поездов метрополитена.

В работе предложен специально разработанный новый математический аппарат, который позволяет выполнить аналитический расчет графика движения. Для этого введены понятия «расстояния между поездами» и «потенциал положения транспортного средства на кольце» по формуле (3). Показано, что чем больше потенциал положения транспортного средства, тем сложнее его догнать отстающим поездам. Таким образом, разработана математическая модель в виде нормированного метрического пространства в множестве координат расположений поездов на линии-кольце. Использование метрического пространства создает возможность парирования отклонения от графика движения поездов путем изменения времени стоянки поезда на станциях или изменения времени хода поездов на перегоне, причем время возврата к графику движения с равными интервалами является минимально возможным. Применение метода потенциалов и созданной математической модели позволило разработать составление части расписания перехода от утренней расстановки к утреннему часу пик за заданное время. Также разработана часть методики, отвечающая за переход от вечернего часа пик к ночной расстановке поездов. Поставлена и решена оптимальная по быстродействию задача изменения числа поездов метрополитена в течение дня. Для этого доказано, что оптимальное управление может быть найдено с помощью алгоритма Евклида и его адаптации для вычисления времен снятия поездов с маршрута или их возвращения на маршрут. Предложенная методика апробирована для графика движения поездов виртуальной линии. Особенностью предложенных методик составления расписания является то, что разработанные методики

предназначены для составления расписания любого вида линии метрополитена.

Достоинством методик является их высокое быстродействие, которое обеспечивается тем, что расчеты осуществляются по полученным конечным формулам, а также и тем, что удалось производить расчеты в целых числах. Последнее также обеспечивает минимизацию использования памяти ЭВМ.

Основным недостатком является требование к адаптации методики для его реального использования диспетчерами, когда становится необходимым нахождение всех исходных данных и обоснование их корректности. Подобная адаптация необходима индивидуально для каждой линии метрополитена с учетом ее особенностей и специфики.

Библиографический список

1. О метрополитене. — URL: <https://gup.mosmetro.ru/o-metropolitene/>.
2. Лазарев А. А. Составление оптимального расписания движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой с разъездом / А. А. Лазарев, И. А. Тарасов // УБС. — 2015. — № 58. — С. 244–283.
3. Игнатенков А. В. Применение искусственной нейронной сети для построения расписаний процессов на примере графика движения поездов / А. В. Игнатенков, А. М. Ольшанский // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2015. — № 11. — С. 50–55.
4. Лебедев А. В. Применение искусственных нейронных сетей в оперативном управлении движением поездов / А. В. Лебедев // Вестник ИрГТУ. — 2008. — № 4. — С. 81–84.
5. Исаков Т. А. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Исаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 1. — С. 38–63. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.
6. Сидоренко В. Г. Применение методов искусственного интеллекта к решению задач планирования перевозочного процесса метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях: Труды Всероссийской научно-практической конференции ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки с международным участием, Хабаровск, 29 сентября 2017 года; под ред. А. И. Годяева. — Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2017. — С. 197–201.

7. Даниленко Т. М. Моделирование графика движения поездов по линии Харьковского метрополитена / Т. М. Даниленко, В. А. Булах // ВЕЖПТ. — 2011. — № 3(50). — С. 54–57.
8. Derrible S. The complexity and robustness of metro networks / S. Derrible, C. Kennedy // *Physica A* 389(17). — 2010. — Pp. 3678–3691.
9. Liu P. A robust and energy-efficient train timetable for the subway system, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* / P. Liu, M. Schmidt, Q. Kong et al. — 2020. — Part 121. — Pp. 102822–102849.
10. Yang X. A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit / X. Yang, X. Li, B. Ning, T. Tang // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 2–13.
11. Haładyn S. The Problem of Train Scheduling in the Context of the Load on the Power Supply Infrastructure / S. Haładyn // *A Case Study. Energies*. — 2021. — Part 14. — Pp. 8248–8260.
12. Xu W. A Practical Method for Timetable Rescheduling in Subway Networks during the End-of-Service Period / W. Xu, P. Zhao, L. Ning // *Journal of Advanced Transportation*. — 2018. — Pp. 1–9.
13. Jovanović P. Optimal allocation of buffer times to increase train schedule robustness // P. Jovanović, P. Kecman, N. Bojović, D. Mandić // *European Journal of Operational Research*. — 2017. — Part 256. — Pp. 44–54.
14. Wang P. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling / P. Wang, R. M. Goverde // *European Journal of Operational Research*. — 2019. — Part 272. — Pp. 621–635.
15. Cacchiani V. Robust Train Timetabling / V. Cacchiani, P. Toth // *Handbook of Optimization in the Railway Industry; International Series in Operations Research and Management Science 268*; Springer: New York, NY, USA. — 2018. — Pp. 93–115.
16. Schipper D. Differences and similarities in European railway disruption management practices / D. Schipper, L. Gerrits // *J. Rail Transp. Plan. Manag.* — 2018. — Part 8. — Pp. 42–55.
17. Binder S. The multi-objective railway timetable rescheduling problem / S. Binder, Y. Maknoon, M. Bierlaire // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — Vol. 78. — 2017. — Pp. 78–94.
18. Колмогоров А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. — М.: Наука, 1972. — С. 544.
19. Сеславин А. И. Принципы равномерности в задачах управления потоками пассажирского транспорта / А. И. Сеславин, Е. А. Сеславина // *Прикладная информатика*. — 2009. — № 2(20). — С. 91–95.
20. Логинова Л. Н. Математические методы и основные принципы организации транспортных перевозок / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // *Транспортное дело России*. — 2021. — № 4. — С. 84–87. — DOI 10.52375/20728689_2021_4_84.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 67–77

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-67-77

Methodology of Train Traffic Scheduling for the Capital Underground

Information about authors

Loginova L. N., PhD in Technical Sciences, Assistant Professor¹. E-mail: ludmilanv@mail.ru

Seslavina E. A., PhD in Economic Sciences, Assistant Professor². E-mail: seslavina@mail.ru

Seslavin A. I., Senior Teacher¹. E-mail: aiseslavin@gmail.com

¹ Russian University of Transport (MIIT).

Department of Management and Data Protection, Moscow

² Russian University of Transport (MIIT).

Department of Informational Systems of Digital Economy, Moscow

Abstract: Traffic schedule of trains on Moscow underground line at present is made up by highly qualified schedulers from underground dispatcher apparatus. Created timetable acts for many days as a law for metro drivers and takes into account the variability of passenger traffic by days of a week and hours of a day. At present, ready schedule represents many-pages primary document, having additions in the form of train turnover schedule and timetable for train teams which consist sometimes of one machinist and sometimes are added by an assistant. Besides, the schedule also for turned round machinist teams exists. These teams anytime conduct empty trains in line dead ends in tunnels whiles main team can go at final station from the end of train to its head and also have a rest sometimes. Except turned round teams there are shift-teams who provides for possibility of lunchtime and leisure for main teams in their every day job. Thus, set of timetables exists which chain major link is train traffic schedule. Because

of the difficulties with scheduling which are overcome at present by trial and error method, the possibilities for to create schedule many variants with the purpose of subsequent selection suiting best amongst them, are absent in the majority of cases. Such selection might be made in the following purposes: minimization of electric energy expenditures during the day, increase of schedule stability to fluctuations, constantly acting per day, of kind of little fails because of passenger big inflow on a station or small violations of traffic safety. The listed set of problems can be overcome in the case of existence of central administration of all trains of metro line with the help of computational technics. There's been suggested in the work the methodology of scheduling for underground trains on the basis of mathematical apparatus which provides for schedule final calculation inclusive of all requirements and limitations. The specificity of developed methodology is in its processability for further realization in the form of program product.

Key words: train traffic timetable; underground; mathematical apparatus; management of transport systems; night arrangement; uniform intervals; mathematical modelling; potential method; Euclid algorithm.

References

1. *O metropolitene* [About metro]. Available at: <https://gup.mosmetro.ru/o-metropolitene> (accessed 30 September 2021).
2. Lazarev A. A., Tarasov I. A. Sostavlenie optimal'nogo raspisaniya dvizheniya poezdov mezhdru dvumya stantsiyami, Soedinennymi odnopushtnoy zheleznoy dorogoy s raz'ezdom [Compilation of the optimal train schedule between two stations connected by a single-track railway with a siding]. *UBS* [UBS]. 2015, I. 58, pp. 244–283.
3. Ignatenkov A. V., Ol'shanskiy A. M. Primenenie iskusstvennoy neyronnoy seti dlya postroeniya raspisaniy protsessov na primere grafika dvizheniya poezdov [Application of an artificial neural network for the construction of process schedules on the example of a train schedule]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i*

- IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT education]. 2015, I. 11, pp. 50–55.
4. Lebedev A. V. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey v operativnom upravlenii dvizheniem poezdov [The use of artificial neural networks in the operational control of train traffic]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of ISTU]. 2008, I. 4, pp. 81–84.
 5. Podkhody k otsenke kachestva planirovaniya i upravleniya dvizheniem passazhirskikh poezdov metropolitena [Approaches to assessing the quality of planning and traffic control of metro passenger trains]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2020, V. 6, I. 1, pp. 38–63. — DOI 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.
 6. Sidorenko V. G. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta k resheniyu zadach planirovaniya perezozhnogo protsessa metropolitena* [Application of artificial intelligence methods to solving problems of planning the metro transportation process]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2017, pp. 197–201.
 7. Danilenko T. M., Bulakh V. A. Modelirovanie grafika dvizheniya poezdov po linii Khar'kovskogo metropolitena [Simulation of the train schedule along the Kharkov metro line]. *VEZhPT* [VEZhPT]. 2011, I. 3 (50), pp. 54–57.
 8. Sybil Derrible, Christopher Kennedy. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A* 389 (17). — 2010. — Pp. 3678–3691.
 9. Pei Liu, Marie Schmidt, Qingxia Kong, Joris Camiel Wagenaar, Lixing Yang, Ziyu Gao, Housheng Zhou. A robust and energy-efficient train timetable for the subway system, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Part 121. — 2020. — Pp. 102822–102849.
 10. Xin Yang, Xiang Li, Bin Ning, Tao Tang. A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Volume 17. — 2015. — Pp. 2–13.
 11. Haładyn, S. The Problem of Train Scheduling in the Context of the Load on the Power Supply Infrastructure. A Case Study. *Energies*. Part 14. — 2021. — Pp. 8248–8260.
 12. Wenkai Xu, Peng Zhao, and Liqiao Ning. A Practical Method for Timetable Rescheduling in Subway Networks during the End-of-Service Period. *Journal of Advanced Transportation*. — 2018. — Pp. 1–9.
 13. Jovanović, P., Kecman, P., Bojović, N., Mandić, D. Optimal allocation of buffer times to increase train schedule robustness. *European Journal of Operational Research*. Part 256. — 2017. Pp. 44–54.
 14. Wang P.; Goverde R. M. Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling. *European Journal of Operational Research*. Part 272. — 2019. — Pp. 621–635.
 15. Cacchiani V., Toth P. Robust Train Timetabling. In *Handbook of Optimization in the Railway Industry; International Series in Operations Research and Management Science 268*; Springer: New York, NY, USA. — 2018. — Pp. 93–115.
 16. Schipper D., Gerrits L. Differences and similarities in European railway disruption management practices. *J. Rail Transp. Plan. Manag.* Part 8. — 2018. — Pp. 42–55.
 17. Binder S., Maknoon Y., Bierlaire M. “The multi-objective railway timetable rescheduling problem,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 78. — 2017. — Pp. 78–94.
 18. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Nauka Publ. Moscow, 1972. P. 544.
 19. Seslavina A. I. Seslavina E. A. *Printsipy ravnomernosti v zadachakh upravleniya potokami passazhirskogo transporta. Prikladnaya informatika* [Principles of uniformity in the problems of passenger transport flow control. Applied Informatics]. 2009, I. 2 (20), pp. 91–95.
 20. Loginova, L. N. *Matematicheskie metody i osnovnye printsipy organizatsii transportnykh perezozok* [Mathematical methods and basic principles of organization of transportation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, I. 4, pp. 84–87. — DOI 10.52375/20728689_2021_4_84.