

УДК 656.022.5

А. М. Горбачев, канд. техн. наук

*Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АПЕРИОДИЧЕСКИХ МАРШРУТНЫХ РАСПИСАНИЙ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Приведен анализ научных работ и моделей маршрутных расписаний движения. На основе существующих работ составлена классификация расписаний движения по признаку повторяемости значений времени. Представлено описание сети городского транспорта в виде мультиграфа. Рассмотрен переход от мультиграфа сети городского транспорта к сети событий, характеризующих процесс движения. Формализованы ограничения на значения времени для решения основной задачи теории расписаний. Предложенная формализация учитывает особенности планирования организации движения в России и других странах на постсоветском пространстве. Представлена математическая модель аperiodических маршрутных расписаний движения наземного городского электрического транспорта на основе теории линейного программирования. Обоснован выбор критерия оптимизации при решении основной задачи теории расписаний. В качестве критерия оптимизации при решении основной задачи теории расписаний используется равномерность интервалов движения. В статье имеется табличная форма расписаний, принятая в городском транспорте для описания процесса движения при отсутствии значимых событий на линии. Приведен пример внедрения представленной в данной работе модели в программном обеспечении системы автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов в составе автоматизированной системы управления городским электрическим транспортом, используемой в настоящее время в Санкт-Петербурге для построения расписаний трамваев и троллейбусов. Продемонстрированы примеры расчета диаграмм интервалов по отправлению транспортных средств для демонстрации функции выравнивания интервалов движения. В заключении перечислены достоинства предложенной модели аperiodических маршрутных расписаний движения наземного городского электрического транспорта и дальнейшие пути ее развития.

Городской транспорт, наземный электрический транспорт, маршрутное расписание, аperiodическое расписание, линейная комбинация, система автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов, автоматизированная система управления городским электрическим транспортом

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-499-517

Введение

Современный городской электрический транспорт обеспечивает перевозки большого объема пассажиропотоков экологичным способом. Основной доку-

мент, регламентирующий движение, — маршрутное расписание. Составление его — трудоемкий процесс, на который существенное влияние оказывает человеческий фактор. А конкретно — уровень подготовки инженера — составителя расписания.

В зависимости от наличия или отсутствия заданного интервала времени *Period*, через который события внутри расписания повторяются, можно ввести классификацию расписаний движения, разделив их на две группы: периодические (циклические) и аperiodические.

Периодические (они же циклические, ритмические) расписания — это такие расписания движения, события в которых повторяются через заданный промежуток времени *Period*. Под событиями в данном случае понимается время прибытия (T_{Arr}) и отправления с контрольных точек (T_{Dep}). В качестве контрольных точек в общем случае могут выступать остановки, узловые точки (например перекрестки) и конечные станции. Математические модели, положенные в основу построения периодических расписаний движения в Европе и США, подробно рассмотрены в различных работах для городского [1–4], железнодорожного [5–6] и авиатранспорта [7–8], обзор которых приведен в [9].

Аperiodические расписания не имеют заданного промежутка времени *Period*, через который повторяются события, происходящие в расписании.

Соответственно, для последних интервал между отправлениями транспортных средств является величиной расчетной, а не заданной. Общий обзор математических моделей расписаний приведен в [9].

В большинстве моделей расписаний движения время — величина дискретная [10]. В России, как правило, дискретой считается одна минута. Ниже рассматриваются только целочисленные модели.

Однако рассмотренные авторами модели не учитывают некоторые исторически сложившиеся особенности организации движения на территории России и стран ближнего зарубежья.

1. Особенности организации движения наземного городского электрического транспорта в России и странах ближнего зарубежья

Важнейшей особенностью организации работы наземного городского транспорта в большинстве городов России является движение в общем потоке с автомобильным транспортом (при отсутствии выделенных полос на большинстве участков), а также наличие пересечений в одном уровне с автомобильным транспортом даже при наличии выделенных полос. Соответственно, время пробега городского транспорта по трассе маршрута в общем случае существенно колеблется в зависимости от периода суток, прежде всего из-за многочисленных заторов в движении. При этом в большинстве случаев технология построения расписаний предполагает дискретное изменение времени пробега по периодам суток [10]. При решении задачи синтеза расписаний эти технологические

особенности приводят к невозможности решения задачи обратного отсчета для случая, когда граница периода суток (переходное время) находится внутри рейса. Под задачей обратного отсчета понимается задача расчета времени прибытия по времени отправления.

Учитывая большое влияние на время пробега, которое оказывают заторы в движении, зависящие от времени суток, время торможения и разгона играет несущественную роль и входит в общее время пробега по перегону в качестве константы.

Как правило, по условиям технологии организации движения на городском транспорте водитель не может самостоятельно принимать решение об изменении скорости и должен стремиться к полному соблюдению регламентированных значений. Время хода задается при составлении маршрутного расписания.

Следующая важная особенность — возможность закрепления транспортных средств за бригадами водителей и кондукторов. Это вызвано как особенностями зачастую устаревшего подвижного состава, работающего на линии, так и деталями организации движения на маршруте. Соответственно, возникает простой трамвая, троллейбуса или автобуса во время обеденного перерыва водителя и кондуктора. Существование длительных обеденных стоянок делает применение периодических расписаний неоправданным из-за невозможности сократить длительность обычных (не связанных с перерывом на обед) стоянок. А при задании одинаковой длительности большая продолжительность стоянок на конечных станциях привела бы к сокращению времени полезной работы транспортных средств непосредственно на линии.

Сеть городского транспорта (public transport network) может быть представлена в виде мультиграфа $PTN = (CP; P)$. Он состоит из конечного множества контрольных точек, $cp_i \in \{CP\}$, и конечного множества отрезков, соединяющих эти контрольные точки $p \in \{P\}$, где $p_i \in \{cp_p, cp_{i+p}\}$, т.е. каждый отрезок соединяет две соседние точки, между которыми возможно движение транспорта по трассе (см. рис. 1).

Дополнительной особенностью организации движения в России можно считать принятие стоянок на промежуточных остановках за константы и включение длительности этих стоянок во время хода по трассе маршрута. Это приводит к возможности выравнивания интервалов только с помощью регулирования стоянок на конечных пунктах (конечных станциях).

С учетом этой особенности граф $PTN = (CP; P)$ может быть представлен как граф $PTN = (EndSt; P)$, что подробно рассмотрено в [12].

2. Основная задача теории расписаний движения

Под основной в теории расписаний движения понимается задача определения значений времени при известной структуре маршрутного расписания. Это значит, что на основе известного числа рейсов для каждой части наряда (выхода на линию) рассчитываются значения времени с учетом набора ограничений.

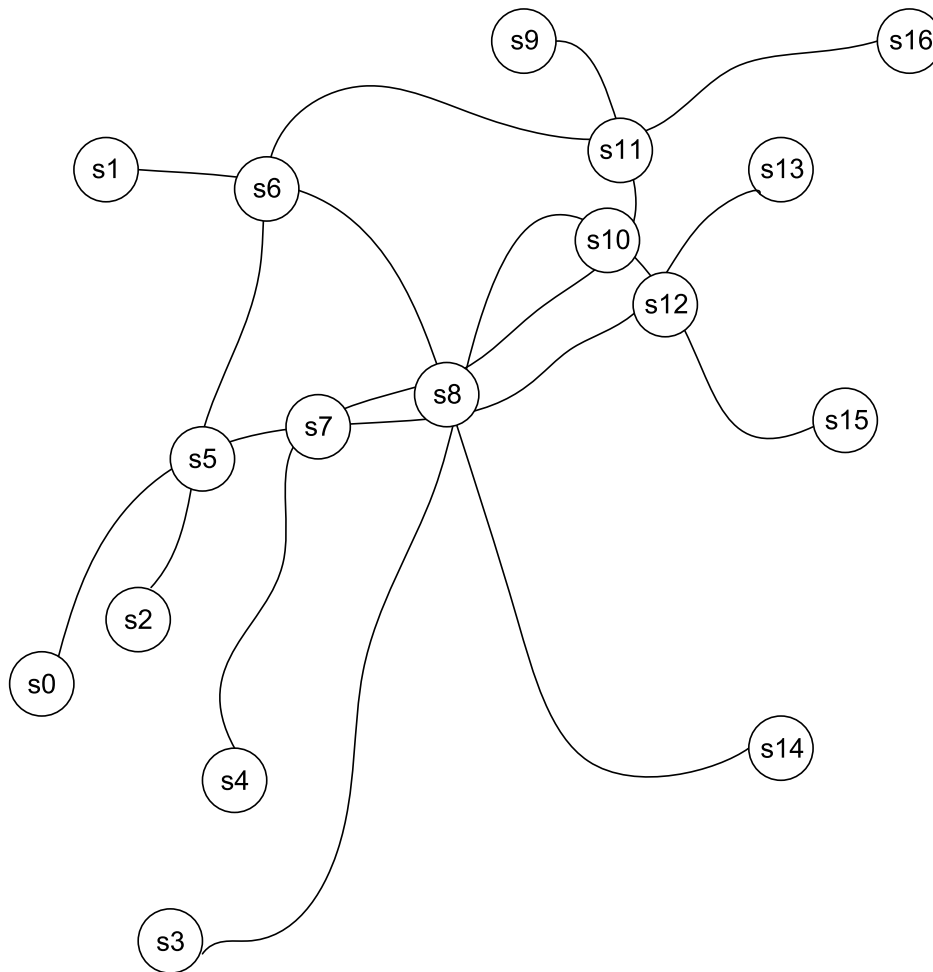


Рис. 1. Пример мультиграфа сети городского транспорта PTN

Возможная формализация постановки основной задачи для аperiodических расписаний с учетом ранее приведенных особенностей организации движения приведена в [9].

Для формализации выполнен переход от мультиграфа сети городского транспорта к сети событий (EAN — Event Activity Network). Для EAN каждый из узлов представлен одним независимым значением времени (см. рис. 2).

Для такой сети событий введены следующие обозначения:

$$EAN = \{TI, [U, V]\}, \quad (1)$$

где $\{TI\}$ — множество элементов TI_i , каждый элемент — независимо изменяемое значение времени; $i = 1..n$ — порядковый номер независимо изменяемого значения времени, который изменяется от 1 до n , где n — число независимых параметров (отправлений с диспетчерских станций); $\{U\}$: $U_i = D_{\min(i, i+1)}$ — минимальный промежуток времени, необходимый для перехода из состояния i в состояние $i+1$ (ограничение снизу на переход в новое состоя-

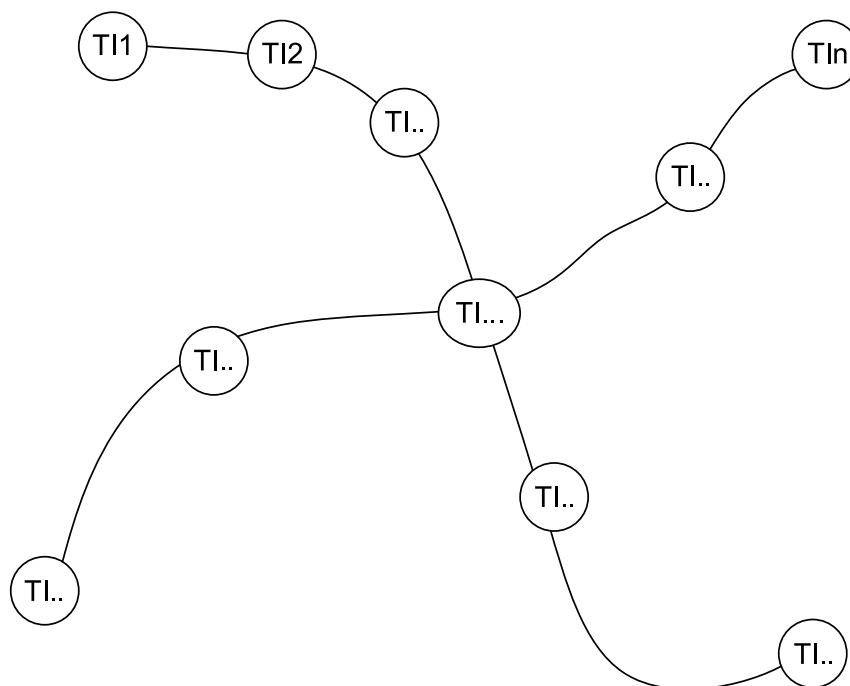


Рис. 2. Пример графа сети событий EAN

ние); $\{V\}$: $V_i = D_{\max(i, i+1)}$ — максимальный промежуток времени, в течение которого возможен переход из состояния i в состояние $i+1$ (ограничение сверху на переход в новое состояние).

Учитывая, что длительности пребывания транспортных средств на остановках общественного транспорта согласно действующей технологии не подлежат регулированию, в качестве независимых значений времени, которые должны быть рассчитаны по условиям задачи, могут выступать прибытия или отправления с конечных станций, между которыми осуществляется движение.

Движение по маршруту в абсолютном большинстве случаев осуществляется между двумя конечными станциями. Тогда возможны два случая. Интервалы движения могут быть отрегулированы за счет одной из станций (одна станция диспетчерская (распорядительная), другая обратная, т. е. контрольный пункт без стоянки или с жестко фиксированной длительностью стоянки). Либо интервалы движения могут быть отрегулированы за счет стоянок на обеих конечных станциях (обе станции являются диспетчерскими). В связи с популярностью первого варианта рассмотрим случай с одной диспетчерской станцией. Модель, представленная в [3], не предполагает возможности оптимизации маршрутного расписания и не учитывает факта разделения стоянок на конечных станциях на типы по признаку зависимости от других параметров.

Здесь предлагается изменить модель представления EAN, предложенную в [11], для учета особенностей организации движения на городском транспорте, приведенных выше.

3. Обоснование выбора критерия эффективности маршрутного расписания

В большинстве существующих теоретических моделей расчета расписаний в качестве критерия качества расписаний принимается минимизация суммарного времени всех пассажиров, затрачиваемого на перемещение в транспорте внутри по транспортной сети *PTN*. В общем случае это будет верным критерием.

Сегодня разработаны многочисленные модели оптимизации аperiodических расписаний, основанные на использовании этого критерия.

Однако для решения задачи минимизации суммарного времени, затрачиваемого на перемещение всеми пассажирами, необходимо знать точные матрицы корреспонденций для учета перемещения людей внутри *PTN*.

В отечественной практике актуальная информация в большинстве случаев отсутствует, поскольку подвижной состав не оборудован датчиками подсчета пассажиропотока, а предприятия-перевозчики не имеют возможности часто проводить натурные обследования. Поэтому в качестве критерия качества аperiodических маршрутных расписаний выбирается другой, более доступный для расчета на практике. За него принимается равномерность изменения интервалов отправления транспортных средств. Так обеспечивается приближение аperiodических расписаний к периодическим, более удобным для пассажиров.

С учетом приведенных выше особенностей, в т. ч. связанных с необходимостью использования критерия равномерности изменения интервалов, можно сделать вывод: многочисленные существующие модели аperiodических расписаний не учитывают практических особенностей организации движения в России. Требуется разработка отдельной модели аperiodических маршрутных расписаний движения.

4. Классификация значений времени для модели аperiodических расписаний движения

Традиционно расписания движения, в которых отсутствуют события на линии (время остановок входит в пробеги по трассе, а скорости однозначно определяются матрицей времен хода), представляет собой таблицу с данными о прибытии и отправлении транспортных средств на линии, а также о выходе транспортных средств на линию из парков (депо) и возвращении в них. Данные таблиц 1 и 2, как и на рисунке 3, — примеры таких расписаний.

Рассмотрим расписания с одной диспетчерской (распорядительной) станцией. В таких расписаниях стоянка на одной конечной станции, называемой оборотной (или контрольным пунктом), жестко фиксирована в исходных данных. Стоянка на другой конечной станции, называемой диспетчерской (или оборотной), — величина расчетная.

Для задачи построения модели аperiodических расписаний движения с учетом равномерности интервалов отправления транспортных средств нужно классифицировать множество значений времени, определенное выше по признаку независимости изменения времени.

В качестве независимо изменяемых значений времени выделим несвязанные между собой значения времени (вектор $[TI]$), на которые влияют только ограничения $\{V\}$ и $\{U\}$.

При выравнивании интервалов по времени отправления с конечных станций такими значениями будут времена отправления с диспетчерской конечной станции $[T_{DepDisp}]$.

Остальные значения времени будут зависимыми параметрами.

К зависимым значениям времени первого порядка отнесем множество значений времени, характеризующее остальные события, происходящие на линии. В него будут входить время прибытия на обе конечные станции и время отправления с оборотной конечной станции.

К зависимым значениям времени второго порядка будут относиться прибытия в парк (депо) и отправления из парка (депо). Эти значения времени характеризуют события, происходящие вне движения на линии.

5. Формирование списков ограничений

Рассмотрим формирование множества ограничений. В рассматриваемой модели множества ограничений $\{V\}$ и $\{U\}$ будут однозначно определяться векторами $[TI_{min}]$ и $[TI_{max}]$, обозначающими минимальные и максимальные значения времени для каждого значения $[TI]$.

Каждому элементу $[TI]$ соответствует по одному элементу из $[TI_{min}]$ и $[TI_{max}]$. Все элементы $[TI_{min}]$ и $[TI_{max}]$ являются значениями времени.

Таким образом, для каждого значения TI_i из $[TI]$ будет справедливо (2):

$$TI_{imin} \leq TI_i \leq TI_{imax}, \quad (2)$$

где i — целое число от 1 до n ; n — число элементов в векторе $[TI]$ (равно числу элементов в $[TI_{min}]$ и $[TI_{max}]$).

Для случая с одной диспетчерской станцией ограничения снизу будут присутствовать, когда в составе данной части наряда уже есть рейсы с диспетчерской конечной станции.

Необходимо сформировать два набора ограничений — по предыдущим рейсам и по следующим.

Рассмотрим набор ограничений по предыдущим рейсам. Учитывая, что только одна конечная станция является диспетчерской, предыдущие значения времени до момента отправления с предыдущей конечной диспетчерской станции будут зависимыми значениями времени. Соответственно, векторы ограничений

по предыдущим рейсам $[TI_{min_Prev}]$ и $[TI_{max_Prev}]$ можно вычислить по формулам (3) и (4):

$$TI_{imin_Prev} = TI_i - T_{MinS} - \Delta_{i,i-1} - T'_{MinS} - \Delta'_{(i,i-1)}, \quad (3)$$

$$TI_{imax_Prev} = TI_i - T_{MaxS} - \Delta_{i,i-1} - T'_{MaxS} - \Delta'_{(i,i-1)}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\min(i,i-1)}$ — продолжительность рейса с предыдущей конечной станции (контрольного пункта) до данной (один рейс в обратном направлении); $\Delta'_{\min(i,i-1)}$ — продолжительность предыдущего рейса с диспетчерской конечной станции до контрольного пункта (два рейса в обратном направлении); T_{MinS} — длительность минимальной стоянки на диспетчерской конечной станции; T'_{MinS} — длительность минимальной стоянки на контрольном пункте; T_{MaxS} — длительность максимальной стоянки на диспетчерской конечной станции; T'_{MaxS} — длительность максимальной стоянки на контрольном пункте.

Время рейса на данную диспетчерскую станцию из контрольного пункта можно рассчитать по формуле с использованием функции обратного отсчета времени *RunTimeBack* (подробнее [11, 12]):

$$\Delta_{i,i-1} = RunTimeBack(TI_p, Matr(TI_{iArrMin})), \quad (5)$$

где $Matr(TI_i - T_{MinS})$ — матрица времен хода по периодам суток для движения в обратном направлении для времени прибытия на эту диспетчерскую станцию; $TI_{iArrMin} = TI_i - T_{MinS}$ — время прибытия на диспетчерскую станцию, рассчитанное для случая минимальной стоянки.

По аналогии набор ограничений по следующим рейсам может быть рассчитан по формулам (6) и (7):

$$TI_{imin_Next} = TI_i + \Delta_{i,i+1} + T'_{MinS}, \quad (6)$$

$$TI_{imax_Next} = TI_i + \Delta_{i,i+1} + T'_{MaxS}, \quad (7)$$

где $\Delta_{\min(i,i+1)}$ — продолжительность рейса с диспетчерской конечной станции до контрольного пункта (один рейс в прямом направлении), может рассчитываться по формуле (8).

$$\Delta_{\min(i,i+1)} = RunTime(TI_p, Matr(TI_p,)), \quad (8)$$

где $RunTime(TI_p, Matr(TI_p, Dir))$ — функция прямого отсчета времени (подробнее [11, 12]).

Если предыдущий (или следующий) рейс отсутствует (такое возможно, например, при формировании ограничений для первых и последних рейсов в наряде), то соответствующее слагаемое принимается равным нулю.

Объединяя оба набора ограничений, получим (9) и (10):

$$TI_{imin} = \text{Max} (TI_{imin_Prev}, TI_{imin_Next}), \quad (9)$$

$$TI_{imax} = \text{Min} (TI_{imax_Prev}, TI_{imax_Next}). \quad (10)$$

6. Генерация стандартной временной сетки

В качестве стандартной сетки примем вектор $[TIn]$, имеющий такое же число элементов, как и $[TI]$, и представляющий собой равномерное распределение значений времени внутри закрытого промежутка $[TI_0; TI_k]$, где k — число элементов в $[TI]$. Значения для i -го элемента в векторе $[TIn]$ будут рассчитываться по формуле (11):

$$TIn_i = \text{Round}(TI_0 + \frac{TI_k - TI_0}{k \cdot i}), \quad (11)$$

где Round — функция математического округления до ближайшего целого (с учетом значения дискреты).

Вектор будет являться идеальным расписанием (в смысле соблюдения критерия равномерности интервалов) движения без учета влияния ограничений $\{U\}$ и $V\}$.

7. Модель аperiodических расписаний движения

Новые значения вектора $[TI]$ могут быть рассчитаны на основе линейной комбинации старых значений $[TI]$ и $[TIn]$, где s — коэффициент этой линейной комбинации векторов.

Коэффициент линейной комбинации можно рассчитать в цикле от 1 до n , где на каждом шаге рассчитывается коэффициент по формуле (12):

$$s = \text{Min}(s, \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_i - TIn_i}{TI_i - TIn_i}, \text{ при } TI > TIn_i \\ \frac{U_i - TIn_i}{TI_i - TIn_i}, \text{ при } TI < TIn_i \end{array} \right\}). \quad (12)$$

После нахождения коэффициента линейной комбинации по формуле (12) можно рассчитать вектор $[TI]$ согласно (13):

$$[TI] = s[TI] + (1 - s)[TIn]. \quad (13)$$

На основе рассчитанных значений вектора можно определить полный набор зависимых значений времени. Сначала рассчитываются зависимые значения времени первого порядка, затем значения времени второго порядка.

Предложенная модель расчета $[TI]$ обеспечивает максимально возможную близость к идеальному расписанию по равномерности интервалов $[TIn]$ с учетом множеств ограничений $\{U\}$ и $\{V\}$.

Приведенная модель обеспечивает полиномиальную сложность решения задачи, что позволяет говорить о возможности практического применения модели при решении задач выравнивания интервалов.

8. Практическое применение разработанной модели аperiodических маршрутных расписаний

Предложенная модель аperiodических расписаний движения реализована в Системе автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов (САПР РДТТ), используемой в Санкт-Петербурге для планирования организации трамвайного и троллейбусного движения (см. рис. 3). На рисунке 3 в главном окне программы изображен фрагмент расписания выходного дня в табличной форме для троллейбусного маршрута № 17 в программе САПР РДТТ.

В терминах программного обеспечения САПР РДТТ решение основной задачи теории расписаний называется выравниванием интервалов. Согласно рассмотренным выше условиям постановки задачи, это отражает для данной модели суть получаемого результата, когда в итоге работы алгоритма пользователь формирует расписание движения с максимально возможным ровным изменением интервалов с учетом наложенных ограничений.

Система автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов в составе Автоматизированной системы управления городским электрическим транспортом обеспечивает ручное и автоматическое формирование начального варианта расписаний. Вопросы генерации структуры расписания выходят за рамки рассмотрения данной статьи. После создания начального варианта расписания в ручном режиме фрагменты расписания, содержащие увеличенные стоянки (например, обеденные перерывы) не будут выровнены.

Ниже представлен пример фрагмента расписания рабочего дня для маршрута № 3 в виде таблицы (см. табл. 1).

Каждые две строки таблицы маршрутного расписания — это описание движения одного транспортного средства.

Например, «0604» — время выхода первого транспортного средства на линию, «0645» — прибытие на конечную станцию «Площадь Репина» (столбец «Реп.»), «0650» — отправление с нее на станцию «Сенная площадь» (столбец «Сенн») и т. д.

САПР РДТТ: Z:\projects\GET\ТБ_17_В_2011-08-19 v3.tbx

Файл Исходные данные Вид Редактирование Настройки Расчет Книга пробегов Справка
 [Icons: Save, Print, Home, Close, Copy, Paste, Undo, Redo, Erase, Fill, Sun, Grid, Plus, Minus, X, Left Arrow, Right Arrow, Up Arrow, Down Arrow, Plus, Minus, Flag, Truck, Plus, Minus]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
Тип	1/1	Вып.	Сызранская ул.	Костюшко	Сызранская ул.	Костюшко	Сызранская ул.	Костюшко	Сызранская ул.	Костюшко	Сызранская ул.	Костюшко	Сызранская ул.			
1	БВ	1п	0552	0605	0626	0703	0724	0801	0822г	0901	0924f	1030	1053	1132	1155	
					32^	19	30^19	9	30^11	11	56^16	16	58^16	16	1200^1	
2	БВ	6дв	1441													
3	БВ	5сд	0758			0811	0832г	0912	0935	1014	1037	1116		1139f		
								10	41^11	11	40^16	16	42^15	15	1214^1	
4	БВ	2п	0611	0624	0645	0722	0743	0821	0842	0927	0950f	1101	1124	1204	1228г	
					19	51^19	19	50^20	10	53^12	15	1027^16	16	30^16	16	40^1
5	БВ	3п	0631	0644	0705	0742	0803	0838	0859	0942	1005	1045	1108f	1220	1244г	
					20	11^20	20	07^17	17	0908^15	15	11^15	15	45^15	16	53^1
6	БВ	4ду	0739			0752	0813	0850	0911	0958	1021f	1148	1211г	1303	1327	
						10	19^12	12	24^16	16	1114^16	16	27^13	13	33^1	

Рис. 3. Интерфейс главного окна САПР РДТТ

Таблица 1. Фрагмент начального варианта расписания рабочего дня маршрута № 3, созданный в САПР РДТТ

Вып.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Из	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн
0604	0645	0705	0724	0744	0803	0823	0842	0902	0921	0943	1002x	1024	1045	1107
	50	09	29	48	08	27	47	06	28	47	07	28	50	11
0649		0715	0730	0750	0809	0829	0848	0908	0927	0950	1009x	1031	1052	1114
			35	54	14	33	53	12	35	54	14	35	57	18
0617	0658	0718	0737	0757	0816	0836	0855	0915	0934	0957	1018x	1040	1101	1123
	0703	22	42	0801	21	40	0900	19	42	1001	23	44	06	27
0658		0724	0739	0803	0822	0842	0901	0922	0941 т	1005	1026x	1048	1109	1131
			48	07	27	46	07	26	50	09	31	52	14	35
0630	0711	0731	0746	0809	0828	0848	0907	0929	0948 т	1013	1034x	1056	1117	1139
	16		54	13	33	52	14	33	58	17	39	1100	22	43
0711		0739	0754	0816	0835	0855	0914	0936	0955 т	1023	1044x	1106	1127	1149
			0801	20	40	59	21	40	1006	27	49	10	32	53

Таблица 2. Фрагмент расписания рабочего дня маршрута № 3 после выполнения выравнивания

Вып.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Из	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн
0604	0645	0705	0724	0744	0803	0823	0842	0902	0921	0943	1002x	1031	1052 т	1120
	50	09	29	48	08	27	47	06	28	47	14	35	1103	24
0649		0715	0730	0750	0809	0829	0848	0908	0927	0950	1009x	1039	1100 т	1127
			35	54	14	33	53	12	35	54	22	43	10	31
0617	0658	0718	0737	0757	0816	0836	0855	0915	0934	0957	1018x	1047	1108 т	1135
	0703	22	42	0801	21	40	0900	19	42	1001	30	51	18	39
0658		0724	0739	0803	0822	0842	0901	0922	0941 т	1005	1026x	1055	1116	1142
			48	07	27	46	07	26	50	09	38	59	25	46
0630	0711	0731	0746	0809	0828	0848	0907	0929	0948 т	1013	1034x	1104	1125	1149
	16		54	13	33	52	14	33	58	17	47	08	32	53
0711		0739	0754	0816	0835	0855	0914	0936	0955 т	1023	1044x	1113	1134	1156
			0801	20	40	59	21	40	1006	27	56	17	39	1200

Рассмотрим такой фрагмент для демонстрации работы функции выравнивания и верификации предложенного ранее алгоритма.

В таблицах 1 и 2 представлен один и тот же фрагмент маршрутного расписания до и после операции выравнивания.

В качестве наглядного отображения равномерности интервалов будем использовать диаграмму интервалов по часам суток, сформированную в Системе автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов (рис. 4 и 5).

По результатам выравнивания, выполненного для промежутка времени с 8.00 до 11.00, видно, что произошло усреднение интервала времени (см. рис. 5), что наиболее заметно по интервалу с 9.00 до 10.00.

Внедрение Системы автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов в составе Автоматизированной системы управления городским электрическим транспортом в постоянную эксплуатацию позволило сократить затраты времени на построение маршрутных расписаний (по данным экспериментов, проведенных в СПб ГУП «Горэлектротранс») в 7–8 раз по сравнению с построением расписаний на бумаге, сделанным до программного обеспечения. Однако выравнивание — лишь одна из функций

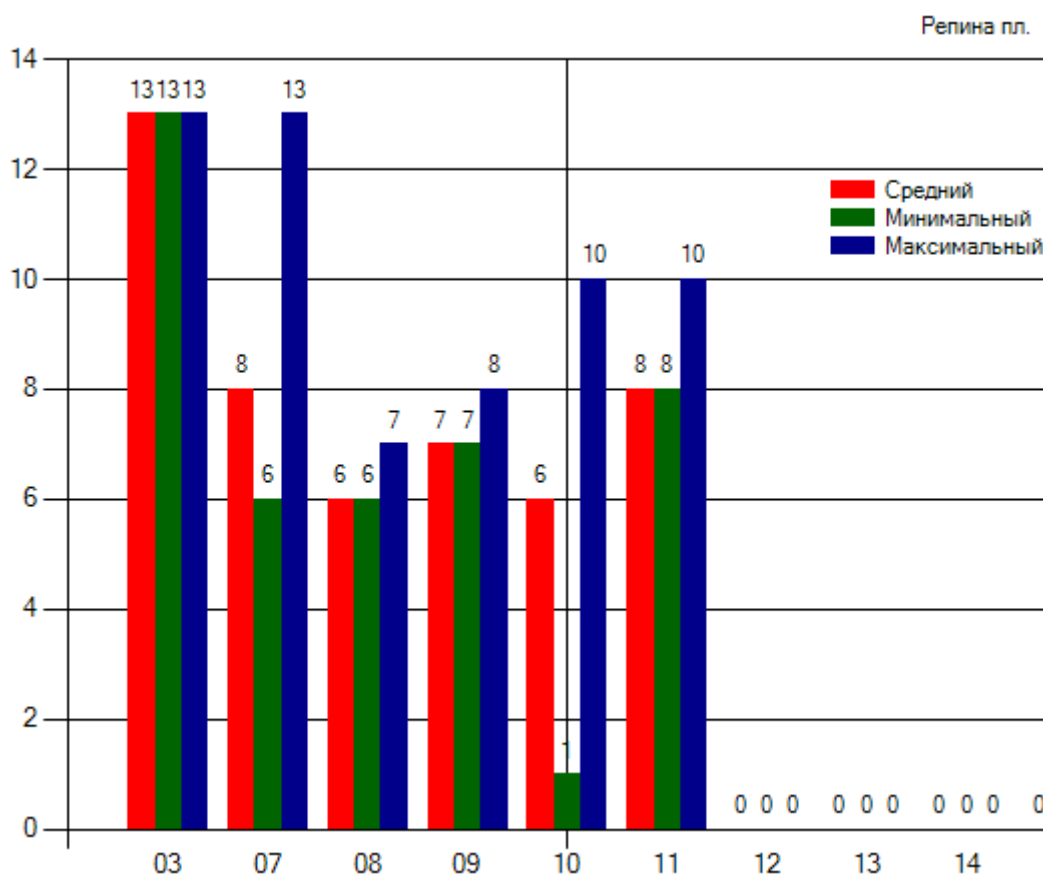


Рис. 4. Интервалы до выравнивания

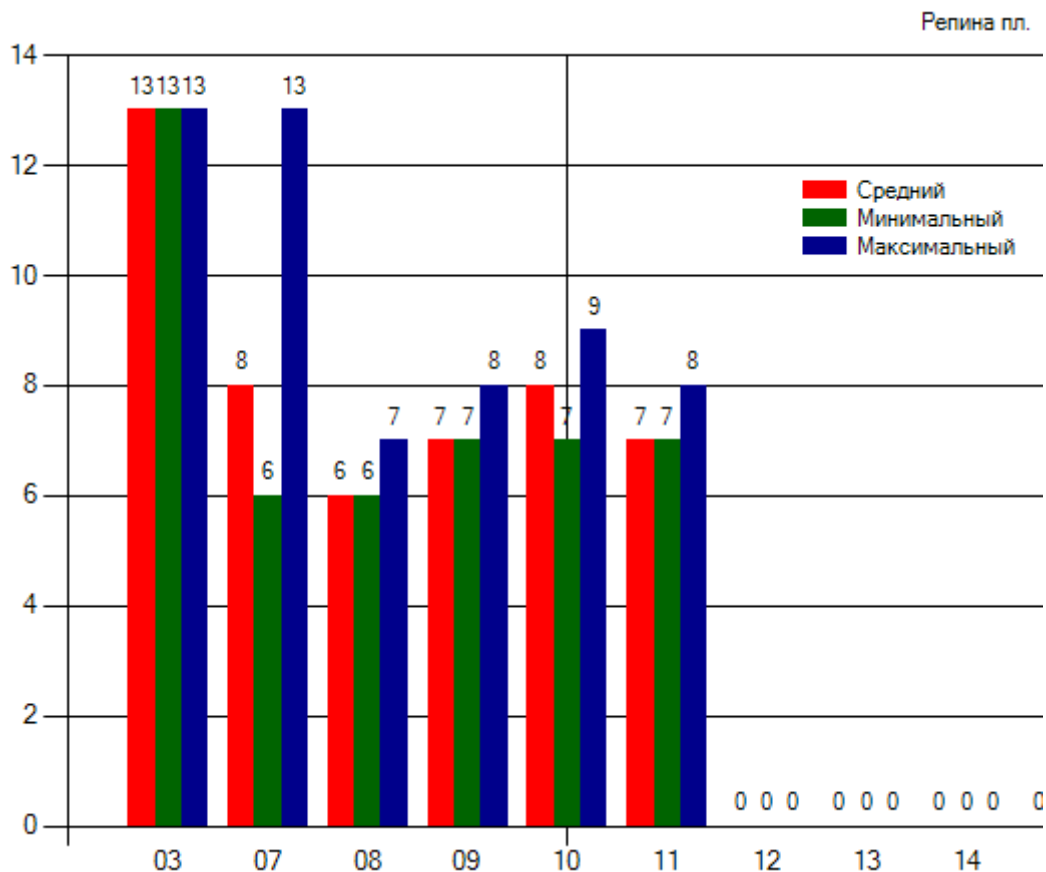


Рис. 5. Интервалы после выравнивания в промежутке с 8.00 до 11.00

информационной системы, обеспечивающих повышение производительности труда.

Заключение

В начале статьи приведена общепринятая классификация расписаний движения маршрутного транспорта. Рассмотренные аperiодические дискретные расписания являются наиболее популярным типом расписаний из числа тех, что используются в отечественной практике. Далее приводятся основные технологические особенности планирования организации движения на городском транспорте в странах постсоветского пространства.

Приведенная в статье математическая модель позволяет решить основную задачу теории расписаний для самого популярного в России класса аperiодических расписаний — с учетом рассмотренных особенностей в организации движения городского наземного транспорта.

Обоснован выбор критерия оптимизации при решении основной задачи теории расписаний. В качестве такового взята равномерность интервалов движения. Приведенный критерий чаще прочих применяется на практике. Это

связано с отсутствием у предприятия-перевозчика актуальной информации о пассажиропотоках по всей городской транспортной сети. Для иллюстрации работы модели выбрана табличная форма представления маршрутных расписаний, принятая на городском транспорте для описания процесса движения. Это форма удобна при отсутствии плановых задержек на линии, когда время стоянок входит в пробеги трасс. Чтобы продемонстрировать, как работает функция выравнивания интервалов движения, в разделе о практическом применении приведены примеры расчета диаграмм интервалов между временем отправления транспортных средств с конечных станций.

Данный метод решения задачи не единственно возможный и предположительно не оптимальный с точки зрения затрат вычислительных мощностей. Но полиномиальная сложность алгоритма и опыт внедрения в Системе автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов, используемой в настоящее время в Санкт-Петербурге для построения расписаний трамваев и троллейбусов, позволяют с уверенностью говорить о положительном эффекте от внедрения в виде повышения производительности труда. Проблемы разработки более эффективных алгоритмов, сравнение их с приведенными, а также оценки сложности и повышения скорости расчетов могут стать предметом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. *Kocheurova E.* Optimizing Urban Public Transportation with Ant Colony Algorithm / E. Kocheurova, E. Gorokhova // 8th International Conference on Computational Collective Intelligence. – Greece : Halkidiki, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45243-2-45>
2. *Liebchen C.* Periodic Timetable Optimization in Public Transport. PhD thesis / C. Liebchen. – Berlin : Technische University Berlin, 2006. – 156 p.
3. *Palmqvist C-W.* Delays and Timetabling for Passenger Trains. PhD thesis / C-W. Palmqvist. – Sweden, Lund : Lund University, 2019. – 107 p.
4. *Liebchen C.* Computer-aided Systems in Public Transport. Springer. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems / C. Liebchen, M. Proksch, F. H. Wagner // Performance of algorithms for periodic timetable optimization. – Berlin : Heidelberg, 2008. – Vol. 600. – P. 151–180.
5. *Vautard F.* Improvement of departure time suitability for interregional rail timetables. PhD thesis / F. Vautard. – Sweden, Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2020. – 37 p.
6. *Cacchiani V.* Non-cyclic train timetabling and comparability graphs / V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth // Operations Research Letters. – 2010. – N 38 (3). – P. 179–184.
7. *Geng X.* Simulated Annealing Method-Based Flight Schedule Optimization in Multi-airport Systems / X. Geng, M. Hu // Mathematical Problems in Engineering. – 2020 – N 3. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2020/4731918>
8. *Lei L.* Flight Schedule Strategy of Airport Group / L. Lei, D. Zhao, H. Liu, D. Guo // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – UK : IOP Publishing, 2020. – Vol. 790 012102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012102>

9. Горбачев А. М. Обзор математических моделей расписаний маршрутного городского транспорта / А. М. Горбачев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15. – № 3. – С. 366–370.
10. Горбачев А. М. Автоматизация синтеза расписаний городского электрического транспорта / А. М. Горбачев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – № 4. – С. 27–32.
11. Горбачев А. М. Формализация представления аperiodических маршрутных расписаний наземного городского электрического транспорта / А. М. Горбачев // «Транспортные интеллектуальные системы-2017»: сб. материалов I международной научно-практической конференции. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 74–81.
12. Schmidt M. E. Integrating Routing Decisions in Public Transport Problems / M. E. Schmidt // Springer Optimization and Its Applications 89. – New York : Springer Science + Business Media, 2014. – 386 p. [https://doi:10.1007/978-1-4614-9566-6-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9566-6-2)
13. Herrigel-Wiedersheim S. Algorithmic Decision support for the construction of periodic railway timetables / S. Herrigel-Wiedersheim. – Zurich : ETH Zurich, 2015. – 167 p.
14. Illes B. Periodic timetable optimization in the public road transport services / B. Illes, R. Ladanyi, G. Sarkozi // Advances Logistics Systems. – 2009. – Vol. 3 (1). – P. 219–225.
15. Schöbel A. The Complexity of Integrating Routing Decisions in Public Transportation Models / A. Schöbel, M. Schmidt // 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS '10). – 2010. – P. 156–169.

A. M. Gorbachev

*The department of "Automation and Telemechanics on Railways"
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

MATHEMATICAL MODEL OF APERIODIC TIMETABLES OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

The analysis of scientific publications and timetable models is given. Existing works have been used as a basis of a classification of timetables by the frequency of time values. The urban transport network is presented in the form of a multigraph. The transition from a multigraph of the urban transport network to a network of events characterizing the traffic process is considered. Constraints on time values have been formalized to solve the main problem of the scheduling theory. The proposed formalization factors in the specifics of traffic management planning in Russia and other post-Soviet countries. A mathematical model of aperiodic timetables for the ground urban electric transport traffic based on the theory of linear programming is presented. The optimization criterion for solving the main problem of the scheduling theory has been substantiated. The uniformity of traffic intervals is used as an optimization criterion for solving the main problem of the scheduling theory. The article provides tabular timetables used in urban transport to describe the traffic process in the absence of significant events on the line. The implementation of the model presented in this article is exemplified by the automated tram and trolleybus timetable design software being part of the automated urban electric transport control system currently used in Saint Petersburg to form tram and trolleybus timetables. The examples of calculating the vehicle departure interval diagrams have been used to demonstrate the function of aligning the traffic intervals. In conclusion, the advantages and development paths of the proposed model of aperiodic timetables for the ground urban electric transport traffic are listed.

Urban transport, ground electric transport, timetable, aperiodic timetable, linear combination, automated tram and trolleybus timetable design system, automated urban electric transport control system

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-499-517

References

1. Kochegurova E. & Gorokhova E. (2016) Optimizing Urban Public Transportation with Ant Colony Algorithm. *8th International Conference on Computational Collective Intelligence*. [https://doi.org/ 10.1007/978-3-319-45243-2-45](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45243-2-45).
2. Liebchen C. (2006) Periodic Timetable Optimization in Public Transport. PhD thesis. Berlin, Technische Universität Berlin Press, 156 p.
3. Palmqvist C-W. (2019) Delays and Timetabling for Passenger Trains. PhD thesis. Sweden, Lund: Lund University Press, 107 p.
4. Liebchen C., Proksch M. & Wagner F. H. (2008) Computer-aided Systems in Public Transport. Springer. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Performance of algorithms for periodic timetable optimization. Berlin, Heidelberg Press, vol. 600, pp. 151–180.
5. Vautard F. (2020) Improvement of departure time suitability for interregional rail timetables. PhD thesis. Sweden, Stockholm, KTH Royal Institute of Technology Press, 37 p.
6. Cacchiani V., Caprara A. & Toth P. (2010) Non-cyclic train timetabling and comparability graphs. *Operations Research Letters*, no. 38 (3), pp. 179–184.
7. Geng X. & Hu M. (2020) Simulated Annealing Method-Based Flight Schedule Optimization in Multi-airport Systems. *Mathematical Problems in Engineering*, no. 3, pp. 1–8. [https://doi.org/ 10.1155/2020/4731918](https://doi.org/10.1155/2020/4731918)
8. Lei L., Zhao D., Liu H. & Guo D. (2020) Flight Schedule Strategy of Airport Group. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. UK, IOP Publishing, vol. 790 12102. [https://doi: 10.1088/1757-899X/790/1/012102](https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012102).
9. Gorbachev A. M. (2018) Obzor matematicheskikh modeley raspisaniy marshrutnogo gorodskogo transporta [Overview of mathematical models of urban fixed-route transport timetables]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, no. 3, pp. 366–370. (In Russian)
10. Gorbachev A. M. (2014) Avtomatizatsiya sinteza raspisaniy gorodskogo elektricheskogo transporta [Automation of urban electric transport timetable synthesis]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, no. 4 (41), pp. 27–32. (In Russian)
11. Gorbachev A. M. (2017) Formalizatsiya predstavleniya aperiodicheskikh marshrutnykh raspisaniy nazemnogo gorodskogo elektricheskogo transporta [Formalization of presentation of aperiodic timetables for the ground urban electric transport]. *Sbornik materialov I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Transportnyye intellektual’nyye sistemy–2017” [Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference “Transport Intelligent Systems – 2017”]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., pp. 74–81. (In Russian)
12. Schmidt M. E. (2014) Integrating Routing Decisions in Public Transport Problems. *Springer Optimization and Its Applications 89*. New York, Springer Science + Business Media, 386 p. [https://doi:10.1007/978-1-4614-9566-6-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9566-6-2)
13. Herrigel-Wiedersheim S. (2015) Algorithmic Decision support for the construction of periodic railway timetables. Zurich, ETH Zurich Press, 167 p.
14. Illes B., Ladanyi R. & Sarkozi G. (2009) Periodic timetable optimization in the public road transport services. *Advances Logistics Systems*, vol. 3 (1), pp. 219–225.

15. *Schöbel A. & Schmidt M. (2010) The Complexity of Integrating Routing Decisions in Public Transportation Models. 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS '10), pp. 156–169.*

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым

Поступила в редакцию 22.06.2020, принята к публикации 27.07.2020

ГОРБАЧЕВ Алексей Михайлович — кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: ag@agpage.ru

© Горбачев А. М., 2020