

ISSN 0013-5860

A large, stylized logo consisting of a blue 'E' and a blue 'T' joined together. The 'E' is on the left and the 'T' is on the right, with the top bar of the 'T' overlapping the right side of the 'E'.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

9 2016

№ 9 СЕНТЯБРЬ 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Уважаемые читатели журнала «Электротехника»!	2
Бестемьянов П.Ф., Горлин И.Г. Статистические модели амплитуды и длительности импульсных электромагнитных помех в каналах автоматики и телемеханики метрополитена.	3
Рябцев Г.Г., Желтов К.С. Стенд технологического контроля электрооборудования вагонов метрополитена.	8
Баранов Л. А., Кузнецов Н. А., Максимов В. М. Энергооптимальное управление движением транспортных средств	12
Сидоренко В.Г., Филипченко К.М. Чжо М.А. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена.	19
Власов С.П. Дополнительные возможности вольтодобавочного трансформатора	26
Иньков Ю.М., Федяева Г.А., Тарасов А.Н. Управление тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза с асинхронными двигателями в режиме реализации предельных усилий	31
Иньков Ю.М., Литовченко В.В., Назаров Д.В. Особенности тягового электрооборудования перспективного электроподвижного состава.	38
Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем	44
Аржанников Б.А., Бадер М.П., Бурков А.Т., Котельников А.В., Набойченко И.О. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока.	51
Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. Повышение энергетических показателей электровоза переменного тока за счёт новой структуры управления компенсатором	57
Иньков Ю.М., Клячко Л.М., Сачкова Е.В. Статистическая взаимосвязь основных параметров силовых полупроводниковых приборов и режимов работы преобразовательных устройств.	61
Пудовиков О.Е., Аунг Зо Тун. Система автоматического управления скоростью движения электропоезда городской транспортной системы	68
Щербakov А.В., Погребисский М.Я., Драгунов В.К., Рубцов В.П., Гончаров А.Л., Иващенко М.В., Кожеченко А.С. Методика проектирования систем электронного подогрева катодов сварочных электронных пушек.	72
Авторы опубликованных статей	80

CONTENTS

Dear readers of the magazine «electrical engineering»!	2
P.F. Bestem'yanov, I.G. Gorlin. A statistical model of the amplitude and duration of the pulsed electromagnetic interference in the channels of automation and telemechanics of the metro.	3
G.G. Ryabcev, K.S. Zheltov. The stand for technological control of electric equipment of underground cars.	8
L.A. Baranov, N.A. Kuznetsov, V.M. Maksimov. Energy optimal vehicle traffic control	12
V.G. Sidorenko, K.M. Filipchenko, M.A. Chzho. Influence of train night stay on the operation of underground electric motive power.	19
S.P. Vlasov. Additional features of the booster transformer	26
Yu.M. In'kov, G.A. Fedyaeva, A.N. Tarasov. Control of traction electric drive hybrid shunting locomotive with asynchronous motors in the mode of the maximum effort.	31
Yu.M. In'kov, V.V. Litovchenko, D.V. Nazarov. Features of promising traction electric equipment of electric rolling stock	38
A.S. Kosmodamianskiy, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev. Scalar control systems of traction induction motor	44
B.A. Arzhannikov, M.P. Bader, A.T. Burkov, A.V. Kotelnikov, I.O. Naboychenko. Improvement of main requirements for the system and devices of DC traction power supply	51
Yu.M. Kulnich, S.A. Shukharev. Improving of energy performance AC electric locomotive at the expense of the new management structure of compensator.	57
Yu.M. In'kov, L.M. Klyachko, E.V. Sachkova. Statistic interrelation of the basic parameters of powerful semiconductor devices and converters operation modes	61
O.E. Pudovikov. System of automatic control of speed movements of the electric train of city transport systems	68
A.V. Shcherbakov, M.J. Pogrebisskiy, V.K. Dragunov, V.P. Rubtsov, A.L. Goncharov, M.V. Ivashchenko, A.S. Kozhechenko. Methods for designing the electron cathode heating systems on the electron beam welding guns.	72
Autors of published article	80

Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена

СИДОРЕНКО В.Г., ФИЛИПЧЕНКО К.М., ЧЖО М.А.

Построение планового графика движения поездов (ПГД) состоит из ряда этапов, включающих сбор и анализ исходных данных, формирование требований к интенсивности движения в зависимости от времени суток, техническому обслуживанию электроподвижного состава (ЭПС), определяющему необходимость совместного построения ПГД и графика оборота (ГО) подвижного состава. Одним из вопросов, оказывающих серьезное влияние на процедуру автоматизированного построения ПГД, совместимого с ГО, является способ ночной расстановки составов. В статье представлено математическое обеспечение решения задачи построения совокупности всех возможных вариантов организации ночной расстановки ЭПС на станции метрополитена. Предложенный подход основан на применении теории графов к формализации предметной области и поиску решений. Разработанное алгоритмическое обеспечение может применяться для станций с произвольной конфигурацией путевого развития, описываемой планарным графом. Показано, что реализованные алгоритмы (построения дерева и уплотнения графа) эквивалентны с точностью до изоморфизма получаемой графовой структуре. Предложены программный продукт, реализующий указанные алгоритмы, и способ формализации описания путевого развития.

Ключевые слова: ночная расстановка ЭПС, теория графов, варианты расстановки.

Научные публикации, посвященные автоматизации планирования работы транспортных систем, с одной стороны, рассматривают различные аспекты этой задачи, с другой — применение различных математических методов для решения тех или иных подзадач. Для решения задач управления транспортными системами, относящимися к одному классу, успешно используются разнообразные методы, и наоборот, один и тот же метод может использоваться для решения разных задач. Одним из таких распространенных методов является применение теории графов. Графы эффективно применяются для описания инфраструктуры транспортных предприятий, траекторий движения транспортных средств и решения частных задач планирования. В [1] по-

A train schedule problem consists of some steps: compilation and analysis of source data, requirements formation of a volume traffic in dependency time of a day, requirements maintenance of electric motive power, which determinate necessity for combined generating of train schedule with maintenance schedule. One of the task, which heavy determinate on a procedure automated generating of train schedule combined with maintenance schedule, is solving of trains night stay problem. This article shows some mathematical provision of solving problem of generation all possible variants of trains night stay on station layout. Authors give propose an attitude based of using graph theory for formalization object and finding solution. The devise of algorithmic conforming can be using for station with free configuration of gridiron described by planar graph. It is show that implemented algorithms are (tree construction and sealing of the graph) equivalent veracity of isomorphism graph structure. Balance of the work it is not only program product, it is represent determinate algorithm and method of formalization definition gridiron.

Key words: night stay problem, graph theory, possible variants of trains night stay on station layout.

казана возможность применения теории графов для решения задач планирования технического обслуживания транспортных средств. В данной статье на основе теории графов решается актуальная для различных транспортных систем задача эффективного использования парковочного пространства на примере метрополитена.

Схема рекурсивной параллельной процедуры исполнения сценариев построения процессов ПГД

Процедура автоматизированного построения ПГД пассажирских поездов по линии метрополитена [2, 3] позволяет найти рациональное решение задачи построения ПГД с точки

зрения критериев равномерности методом полного перебора вариантов и предусматривает возможность проведения расчетов с использованием параллельных вычислений.

Автоматизированное построение ПГД рационально проводить, начиная со стационарных процессов (утренний и вечерний «час пик»), так как в этом случае к построению предъявляются наиболее жесткие требования, определяемые высокой парностью движения. Сценарии построения стационарных и соседствующих с ними процессов – равномерного ввода/снятия составов утром и равномерного ввода составов вечером – могут выполняться параллельно.

Время окончания движения электропоездов по линии метрополитена определяется в результате построения процесса ухода составов на ночную расстановку. Минимизация времени окончания движения электропоездов при условии выполнения требований к качеству обслуживания пассажиров является одной из целей управления, на достижение которой направлено построение ПГД. Время окончания движения электропоездов оказывает существенное влияние на организацию диагностических и ремонтных работ на станциях и в тоннелях метрополитена в ночное время, так как одним из условий проведения таких работ является отсутствие напряжения на контактном рельсе.

Учет всех возможных вариантов выхода из ночной расстановки в начале движения и ухода на ночную расстановку в конце движения позволяет увеличить число рассматриваемых вариантов построения ПГД и повысить их качество, в том числе и с точки зрения уменьшения времени окончания движения электропоездов. Как правило, из-за нехватки парковочных мест (путей в депо) все составы не могут быть размещены во время перерыва в движении по заданному маршруту в парках (депо). Более того, это не следует делать, поскольку необходимо поддерживать заданный интервал движения между транспортными средствами на всем протяжении маршрута перед перерывом и после него. Сценарии построения ПГД должны учитывать информацию о последовательности заполнения и освобождения мест на парковочном пространстве, так как она влияет на последовательность движения транспортных средств, что имеет большое значение при организации их технического обслуживания и составлении графика работы персонала, управляющего транспортными средствами. Для некоторых видов транспорта

(рельсовых или троллейбусов) возможности обгона одного транспортного средства другим не существует. В этом случае изменение последовательности движения транспортных средств затруднено и возможно лишь с использованием дополнительных элементов инфраструктуры. В условиях метрополитена такая возможность существует на станциях с путевым развитием и на деповских путях, однако организация движения отдельных транспортных средств не по всей протяженности маршрута снижает качество ПГД. Это надо учитывать при построении ПГД и, в частности, при решении задачи использования парковочного пространства.

Определение порядка заполнения указателей ночной расстановки составов на линии

После окончания пассажирского движения составы могут находиться в депо или на главных и станционных путях линии у указателей ночной расстановки. Под указателем ночной расстановки понимается кортеж, компоненты которого содержат следующую информацию:

наименование и местоположение на путях линии указателя, около которого должна находиться голова состава, назначенного на ночевку в данной географической точке;

условия (возможность использования при заданном типе расстановки и интервалы времени, когда указатель может использоваться) и результаты использования указателя при построении ПГД (связи с другими объектами ПГД);

способы графического представления факта использования указателя в ПГД.

Расположение указателей ночной расстановки зависит от топологии линии. Порядок заполнения указателей является функцией их положения и требований к интервалу времени, когда они должны быть заполнены. Требования к порядку освобождения указателей утром могут отличаться от требований к порядку их заполнения вечером [3].

На рис. 1 показана схема организации ночной расстановки составов на станции, отображающая местоположение указателей N_i ночной расстановки составов для одного из основных типов станций, существующих в Московском метрополитене, – для двухстрелочной станции. Этот тип станций выбран в связи с тем, что представление результатов применения разработанных алгоритмов к данным этого типа наиболее компактно при отображении. Также рассматривались схемы для трехстре-

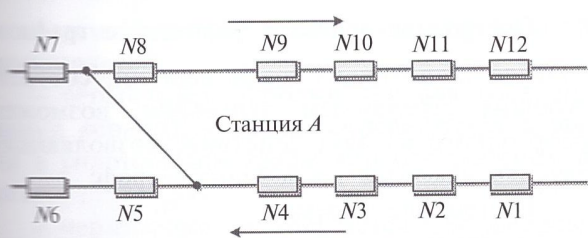


Рис. 1. Схемы расположения указателей ночной расстановки для двухстрелочной станции

ночной, четырехстрелочной и шестистрелочной станций, что нашло отражение в описании результатов, представленных в статье, и может быть расширено для использования и на других типах станций различных метрополитенов [4] или при рассмотрении парковочного пространства других видов транспорта.

На рис. 1 расположение указателей ночной расстановки представлено прямоугольниками N_i , расположенными на прямых, изображающих пути. Точками изображены стрелочные переводы. Стрелками обозначено правильное направление движения поездов по главным путям – пошерстное [5]. Станции могут быть как конечными, так и промежуточными, различаться количеством указателей, которые используются одновременно. При расположении нескольких указателей на одном и том же главном или станционном пути последовательность их заполнения строго определена возможностью достижения их составом. Последовательность заполнения указателей, находящихся на разных станционных путях, может варьироваться.

Необходимо решить задачу автоматического определения последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов. Для решения этой задачи удобно использовать древовидные графы [3].

Подготовка исходных данных

Исходной информацией для решения задачи является схема организации ночной расстановки составов на станции, по которой строится граф, отражающий информацию о взаимном расположении указателей ночной расстановки составов и стрелочных переводов на путях станции.

Такой граф для двухстрелочной станции (рис. 1) показан на рис. 2. На графе приняты обозначения:

- вершины с наклонной штриховкой (ВГШ) обозначают вершины, соответствующие указателям;

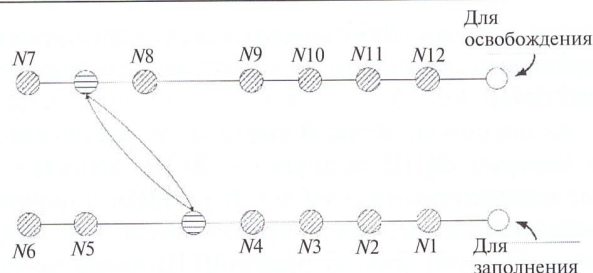


Рис. 2. Граф, полученный по схеме расположения указателей ночной расстановки для конечной двухстрелочной станции

- белые вершины без штриховки обозначают вершины, соответствующие началу освобождения указателей или завершению заполнения указателей. Первыми освобождаются или последними заполняются указатели, которым соответствуют вершины, смежные с белой, т.е. соединенные с ней ребром. В зависимости от того, какое действие выполняется (освобождение или заполнение указателей, и в каком направлении) меняется местоположение белой вершины на графе. Вершине белого цвета в построенном дереве будет соответствовать исток;
- вершины с горизонтальной штриховкой (ВГШ) обозначают вершины, соответствующие стрелочным переводам.

Рассматриваемый граф является смешанным, содержащим как ориентированные, так и неориентированные ребра в зависимости от их положения относительно ВГШ:

- ребро будет направленным и его концом будет являться ВГШ, если оно подходит к ВГШ в пошерстном направлении (движение по стрелочному переводу в направлении от крестовины к его остриякам);

- ребро будет ненаправленным во всех остальных случаях.

В исходном графе каждому стрелочному переводу соответствует своя ВГШ, которой инцидентны как минимум три ребра: одно неориентированное или ориентированное, началом которого является эта ВГШ, и два ориентированных, концом которых является эта ВГШ. Количество ребер, инцидентных ВГШ, т.е. соединяющих ее с другими вершинами, может превышать три, если ей смежны другие ВГШ. Двум ВГШ инцидентны два кратных, т.е. инцидентных одной и той же паре вершин, ребра, направленные противоположно.

Удаление из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам

Первым действием при формировании порядка заполнения указателей ночной расстановки составов на линии является удаление из

графа вершин, соответствующих стрелочным переводам, при этом реализуются следующие действия.

Анализируются пары смежных вершин, одна из которых ВНШ, а другая – ВГШ, инцидентные единственному ребру. Все ВГШ и ребра, инцидентные им, неориентированные или ориентированные, для которых ВГШ была началом, удаляются из графа. Вместе с каждой ВГШ удаляется одно ребро. Остальные инцидентные ВГШ ребра становятся инцидентными той ВНШ, с которой удаленная ВГШ была связана удаленным ребром. Алгоритм повторяется до тех пор, пока из графа не будут удалены все ВГШ. После этого все кратные ребра заменяются единственным неориентированным.

На рис. 3 представлен результат реализации алгоритма для двухстрелочной станции.

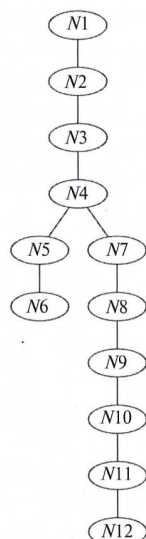


Рис. 3. Результат преобразования схем организации ночной расстановки составов для конечной двухстрелочной станции

Построение дерева и уплотнение графа

После удаления из графа вершин, соответствующих стрелочным переводам, возможен выбор одного из двух действий, позволяющих получить искомым древовидный граф:

- построение дерева;
- уплотнение графа с последующим разворачиванием уплотненного графа в дерево.

Каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки (табл. 1).

Разработанные алгоритмы уплотнения графов и построения деревьев являются комбинацией следующих алгоритмов [6]:

- поиска в ширину (сначала посещаются вершины, которые расположены ближе к исходной вершине, а потом более дальние вершины);

- поиска в глубину (сначала выбирается вершина, смежная с текущей; если все смежные вершины уже посещены или у вершины нет смежных вершин, алгоритм возвращается на последнюю вершину, у которой есть непосещенные смежные вершины);

- топологической сортировки вершин графа с учетом всех возможных перестановок вершин и ряда ограничений, связанных с цветом вершин (это такое упорядочение его вершин, при котором если в графе присутствует ребро, начинающееся в вершине u и заканчивающееся в вершине v , то вершина u появляется до вершины v в упорядочении; это упорядочивание вершин графа вдоль вертикальной линии, при котором все ребра направлены сверху вниз).

При реализации функций уплотнения графа и построения дерева множество цветов, ис-

Таблица 1

Преимущества и недостатки результатов преобразования графов расположения указателей ночной расстановки составов после удаления вершин, соответствующих стрелочным переводам

Способ преобразования	Преимущества	Недостатки	Отличительные черты множества вершин	Отличительные черты множества ребер
Построение дерева	Информация не требует дополнительной обработки при ее использовании в сценариях построения ПГД	Объемное представление информации	Каждой вершине уплотненного графа, имеющей разные пути, приведшие к ней от истока, соответствует отдельная вершина дерева	У каждой вершины дерева есть только одно входящее ребро, соответствующее единственно возможному пути от истока к вершине, и множество исходящих ребер, соответствующих всем ветвлениям пути
Уплотнение графа	Сжатое представление информации	Необходимость дополнительной обработки информации при ее использовании в сценариях построения ПГД	Все вершины дерева, соответствующие одной вершине исходного графа, заменяются одной вершиной уплотненного графа	Все кратные одинаково направленные ребра дерева заменяются одним ребром уплотненного графа с тем же направлением

пользуемых для раскрашивания вершин графа, расширяется:

- серый цвет используется для раскрашивания вершин, которым соответствует вершина в уплотненном графе или построенном дереве;
- черный цвет используется для раскрашивания вершин, обладающих следующим свойством: самой вершине и всем смежным ей вершинам соответствуют вершины в уплотненном графе или построенном дереве.

Построение дерева

Алгоритм построения дерева представляет собой рекурсивную процедуру, имеющую два входных параметра: текущую и запомненную вершины. Текущая – это вершина исходного графа, добавляемая в дерево, запомненная – это последняя добавленная в дерево вершина. При первом запуске алгоритма в качестве текущей вершины рассматривается белая вершина графа, а запомненной вершины не существует. При каждом запуске алгоритма происходит добавление в дерево вершины, соответствующей текущей вершине графа, как смежной к вершине, соответствующей запомненной вершине графа. После этого текущая вершина окрашивается в серый цвет. Далее в цикле просматриваются все серые вершины графа. Для всех ВНШ, смежных текущей серой, происходит рекурсивный запуск описываемого алгоритма. В качестве новой текущей вершины

рассматривается текущая ВНШ, в качестве запомненной вершины – текущая серая. Если серая вершина не смежна ни одной ВНШ, она окрашивается в черный цвет.

На рис. 4 показано дерево, полученное на основе информации, визуализированной на рис. 3, в результате реализации разработанного алгоритма. В названиях вершин построенного дерева последние две цифры совпадают с цифрами в названии соответствующей вершины в исходном графе. Цифры, расположенные левее, дают информацию о том, в какой последовательности добавлялись вершины в дерево, они соответствуют числу вершин в дереве к моменту добавления рассматриваемой вершины.

Уплотнение графа

Алгоритм уплотнения графа работает аналогично. Отличием является то, что в уплотненный граф добавляется новая вершина, если в нем не существует вершины, соответствующей текущей. Далее проверяется условие наличия в уплотненном графе ребра, направленного от запомненной ранее вершины к вершине, соответствующей текущей. В случае, если оно не существует, оно создается.

На рис. 5 представлен уплотненный граф, полученный на основе информации, визуализированной на рис. 3, в результате реализации разработанного алгоритма.

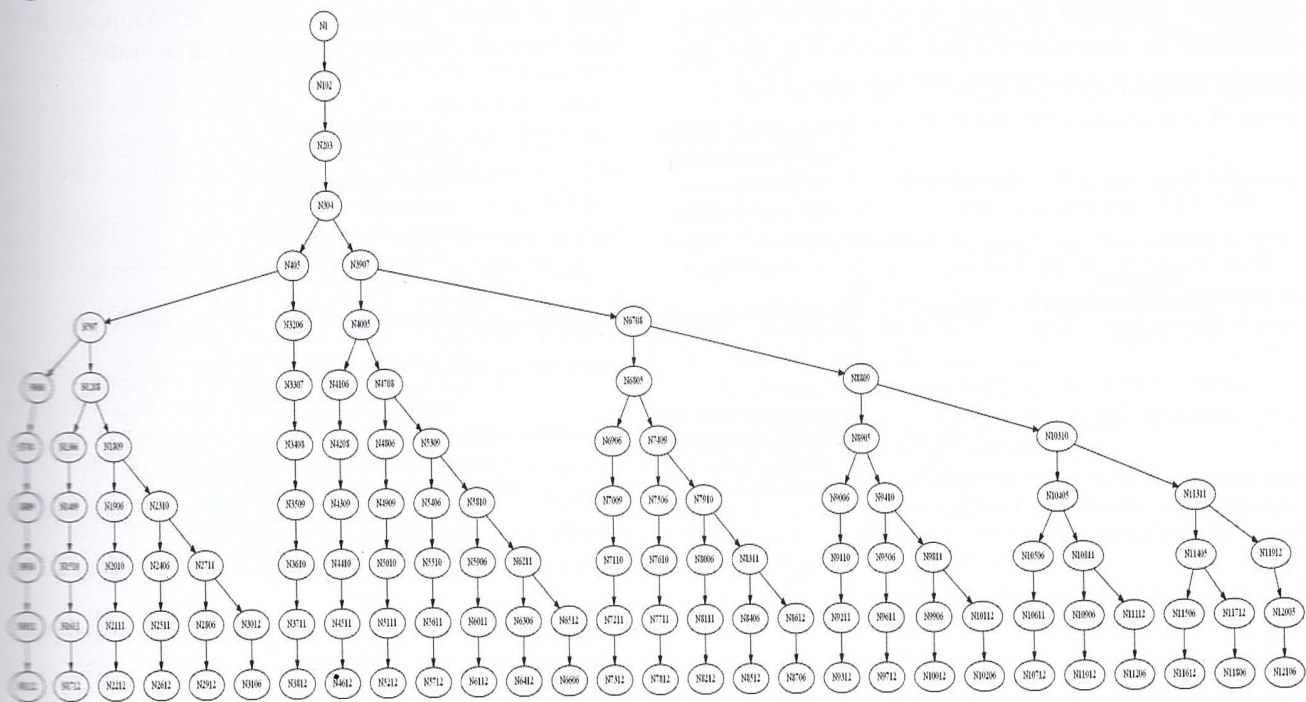


Рис. 4. Дерево, полученное на основе информации для конечной двухстрелочной станции

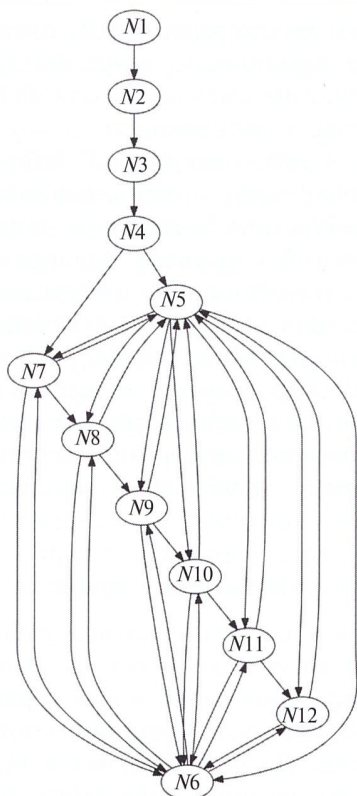


Рис. 5. Уплотненный граф, полученный для конечной двухстрелочной станции

Алгоритм разворачивания уплотненного графа в дерево

Как следует из табл. 1, при сжатом представлении информации о последовательности заполнения и освобождения указателей ночной расстановки составов в виде уплотненных графов требуется ее дополнительная обработка при использовании в сценариях построения ПГД.

Формализуем алгоритм, который позволяет в уплотненном графе найти путь, проходящий через все вершины с соблюдением всех ограничений. Движение начинается с истока. Из текущей вершины возможен переход в любую соседнюю смежную вершину, для которой есть ребро, направленное от текущей. Вершина, к которой выполняется движение, может быть смежной с другими вершинами, еще не включенными в путь, если существует ребро, направленное к ним из той, в которую происходит движение в текущий момент. При невыполнении этого условия движение в вершину недопустимо. Алгоритм выполняется, пока не будут пройдены все вершины. Рассмотрение всех возможных вариантов прохождения вершин уплотненного графа позволяет получить тот же набор последовательностей заполнения или освобождения указателей ночной расстановки составов, что предоставляет соответствующее дерево, т.е. в результате реализации алгоритма получается дерево, изоморфное (вершины соединены ребрами в одном из графов в том и только в том случае, если соответствующие им вершины соединены в другом графе; если ребра ориентированы, то и их направления также должны соответствовать друг другу) ранее построенному [7] (табл. 1 и рис. 6).

Сравнение результатов уплотнения графа и построения дерева

Параметры исходных и уплотненных графов, а также деревьев, соответствующих разным типам станций, приведены в табл. 2.

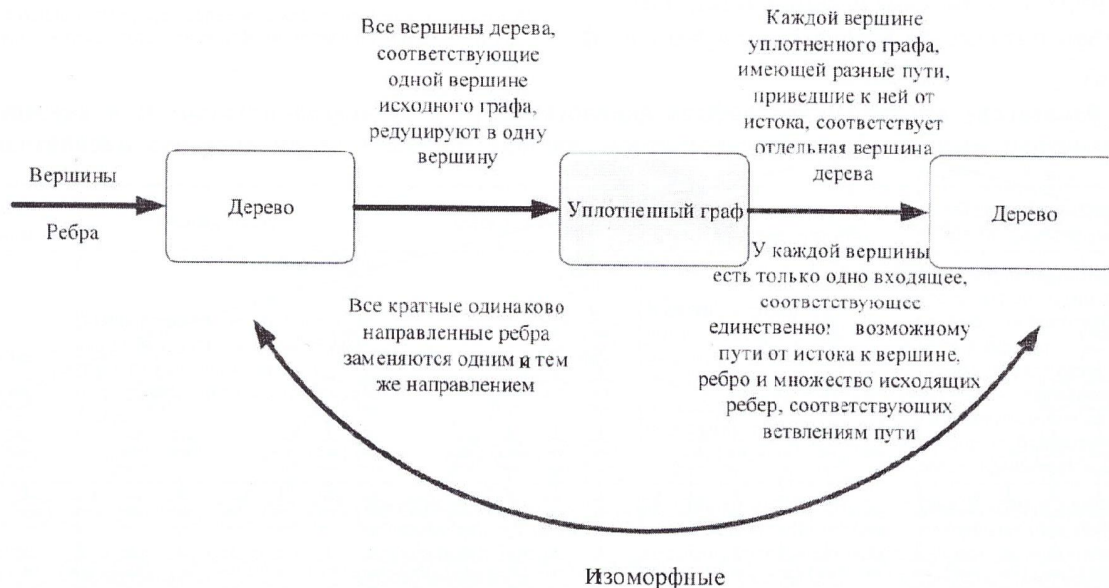


Рис. 6. Возможность получения из уплотненного графа дерева, изоморфного ранее построенному

Таблица 2

Параметры исходных и уплотненных графов, а также деревьев, соответствующих разным типам станций

Типы станций	Исходный граф		Мощность множества ребер «уплотненного» графа	Дерево	
	Мощность множества ребер	Мощность множества вершин		Мощность множества ребер дерева	Мощность множества стоков дерева
2 стрелки	11	12	35	121	28
3 стрелки	12	13	52	1141	360
4 стрелки	12	12	50	1349	420
6 стрелок	14	14	82	35953	12600

Исходные графы являются разреженными. Для всех четырех типов станций мощность множества ребер гораздо меньше квадрата мощности множества вершин. В связи с этим при разработке программного и информационного обеспечения средств автоматизации в качестве способа описания исходных графов выбраны списки смежных вершин – последовательности исходящих ребер для каждой вершины [8]. Такой способ описания – более компактный в случае разреженных графов, чем использование матрицы смежности, и удобен для реализации функций визуализации графов.

Мощность множества вершин уплотненно-го графа совпадает с мощностью множества вершин исходного графа. Мощность множества ребер уплотненного графа превышает мощность множества ребер исходного графа в 3–5 раз.

Мощность множества вершин дерева превышает мощность множества его ребер на единицу. Каждая третья или четвертая вершина является стоком дерева. Мощность множества вершин дерева растет с увеличением количества стрелочных переводов на станции. При переходе от двух стрелочных переводов к трем или четырем мощности множеств, описывающих деревья, увеличиваются на порядок, а при переходе к шести стрелочным переводам – еще в 30 раз. Длина всех возможных путей от истока к стоку в построенных деревьях одна и та же, она меньше мощности множества вершин исходного графа на единицу.

Таким образом, результаты, приведенные в табл. 2, иллюстрируют преимущество использования алгоритма уплотнения графа с последующим разворачиванием уплотненного графа в дерево по сравнению с прямым построением дерева.

Функции ввода информации об указателях ночной расстановки составов и ввода инфор-

мации о размещении указателей ночной расстановки составов на путях линии, а также предложенные алгоритмы реализованы в программном обеспечении автоматизированной системы «АРМ Графиста-2.0», которая является развитием внедренной в 2004 г. на Московском метрополитене автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов [9]. Результаты, представленные на рис. 2–5, получены в ходе работы «АРМ Графиста-2.0». Для визуализации результатов на рис. 3–5 использован пакет утилит по автоматической визуализации графов Graphviz [10].

Список литературы

1. Сидоренко В.Г., Филипченко К.М. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов / Информатизация образования и науки. М.: ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика». 2015. Т. 4. № 28.
2. Сидоренко В.Г. Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена // Вестник МИИТ. 2008. № 18.
3. Сидоренко В.Г. Процедуры организации ночной расстановки составов на линии метрополитен // Вестник МИИТ. 2008. № 18.
4. Баранов Л.А., Воробьев П. Метрополитен Мехико: алгоритмы движения // Мир транспорта. 2012. №4.
5. Тега Г., Власенко С. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира. М.: Интекст, 2010.
6. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ. М.: Вильямс, 2012.
7. Харари Ф. Теория графов. М.: УРСС, 2003.
8. Джереми Сик, Лай-Кван Ли, Эндрю Ламсдэйн. C++ Boost graph library. СПб: Питер, 2006.
9. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов метрополитена // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. 2012. № 2.
10. Tony Ballantyne. Drawing Graphs Using Dot and Graphviz. 2014. <http://www.tonyballantyne.com/graphs.html>