

П.О. Никашина, А.В. Боженюк

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ

Рассматривается одна из наиболее часто встречаемых и значимых проблем быстро развивающихся населенных пунктов – несогласованное регулирование дорожно-транспортных потоков при помощи оптических средств управления на нескольких участках пересечения проезжих частей. Подобная проблема наиболее актуальна в населенных пунктах, с высоким уровнем неконтролируемого прироста населения, использующего в качестве основного средства передвижения – личные транспортные средства. Актуальность сформированной проблемы обосновывается резким увеличением количества участников дорожного движения, влекущего за собой риски возникновения дорожно-транспортных происшествий, а также усложнение логистического проектирования, сопряженного с увеличением финансовых затрат транспортно-логистических компаний. Для решения выявленной проблемы, в рамках представленной работы приведен краткий обзор литературных источников, позволяющий оценить современный уровень развития систем подобного назначения. В результате выполнения данного обзора установлено, что наиболее эффективными методами решения поставленной проблемы, является применение методов нечетких графов. В связи с этим принято решение о проведении исследования указанных методов, в рамках решения выявленной проблематики на примере дорожных участков города Таганрог. В качестве основного подхода применяемого при регулировании дорожно-транспортного движения предлагается использование периодических темпоральных нечетких графов. Данная работа выступает базисом для дальнейших исследований и позволяет сформировать целостное представление об особенностях вышеуказанных графов. Новизна данной работы определяется исходя из применения периодических темпоральных нечетких графов в рамках решения задачи регулирования транспортных потоков на последовательных участках пересечения проезжих частей.

Перекресток; транспортные потоки; регулирование транспортных потоков; периодические нечеткие графы.

P.O. Nikashina, A.V. Bozhenyuk

TRAFFIC FLOW OPTIMIZATION BASED ON PERIODIC FUZZY GRAPHS

In this paper, one of the most common and significant problems of rapidly developing settlements is considered - inconsistent regulation of traffic flows using optical controls at several sections of the intersection of carriageways. This problem is most relevant in settlements with a prominent level of uncontrolled population growth, using personal vehicles as the main means of transportation. The relevance of the formed problem is substantiated by a sharp increase in the number of road users, which entails the risks of traffic accidents, as well as the complication of logistics design, associated with an increase in the financial costs of transport and logistics companies. To solve the identified problem, within the framework of the presented work, a brief review of literary sources is given, which makes it possible to assess the current level of development of systems for this purpose. As a result of this review, it was found that the most effective methods for solving the problem posed are the use of fuzzy graph methods. In this regard, it was decided to conduct a study of these methods, as part of solving the identified problems on the example of road sections of the city of Taganrog. The use of periodic temporal fuzzy graphs is proposed as the main approach used in the regulation of traffic. This work is the initial theoretical basis for further research and allows you to form a holistic view of the features of the above graphs. The novelty of this work is determined based on the use of periodic temporal fuzzy graphs in the framework of solving the problem of regulating traffic flows at successive sections of the intersection of carriageways.

Crossroads; traffic flows; regulation of traffic flows; periodic fuzzy graphs.

Введение. На сегодняшний день эффективное регулирование дорожно-транспортных потоков наиболее важная и острая проблема, с которой сталкиваются быстро развивающиеся города, расположенные на территории Российской Федерации. Актуальность сформулированной проблемы обуславливается множеством факторов, зависящих от эффективности функционирования транспортных систем [1]. К подобным факторам стоит отнести: логистику грузов внутри и за пределами государства, сложности развития внутреннего туризма, увеличение количества дорожно-транспортных происшествий и т. п. Вышеперечисленные факторы способны напрямую влиять на экономику не только отдельно взятых населенных пунктов или регионов, но также на экономику федеральных округов или государства в целом. Однако, невзирая на важность рассматриваемой проблемы, существующие системы дорожно-транспортного регулирования не отвечают современным критериям быстро развивающихся крупным и малых городов, при этом инфраструктура населенных пунктов также не выдерживает подобное количество участников дорожного движения. Модернизация инфраструктуры отдельно взятого населенного пункта влечет за собой значительные финансовые и временные затраты, сопряженные с увеличением нагрузки на иные участки дорожного движения, при этом, проведение подобных работ обособленно от модификации систем регулирования, способны продемонстрировать лишь временный эффект. Основным показателем необходимости модернизации систем транспортного регулирования выступает частота возникновения заторов на тех или иных участках дорожного движения.

Дорожный затор – скопление участников дорожного движения на улице или дорожном покрытии, движущихся со значительно меньшей скоростью чем предполагается для данного участка дороги [2]. Феномен возникновения дорожных заторов обуславливается множеством факторов, в том числе: увеличивающимся объемом движения, недостаточной пропускной способностью перекрестков, ограниченной шириной дорожного полотна и т. п. Еще одним фактором влекущим за собой появление дорожных заторов выступает несогласованность функционирования работы светофоров на последовательных участках пересечения проезжих частей, а также отсутствие адаптивности регулирования транспортных потоков в условиях динамичности и слабой предсказуемости современных городов. Таким образом, в качестве решений выявленной проблемы предлагается к рассмотрению модернизация систем дорожно-транспортного регулирования, путем согласования работы светофоров на последовательных участках пересечения проезжих частей. Так как, количество участников дорожного движения на перекрестке является слабо прогнозируемой величиной, зависящей от времени суток, погодных условий, дней недели и т.п., многие исследователи рассматривают решения данной проблемы с точки зрения применения нечетких системных подходов.

1. Литературный обзор. За первое десятилетие двадцать первого века учеными представлено множество научных работ, посвященных разработке стохастических и детерминированных моделей, лежащих в основе систем, позволяющих осуществлять регулирование дорожных потоков при помощи развернутой системы светофоров. Разработка подобного рода систем осуществлялась с целью ликвидации ряда существующих на тот момент проблем, выявленных в транспортных и инженерных областях. Таким образом, в данной части представленной работы приведен хронологический обзорный анализ научных работ, посвященных разработке и применению различных комплексных и индивидуальных решений, основная задача которых заключается в регулировании процессов дорожно-транспортного движения, основываясь на методах и подходах теории нечетких множеств и графов.

В начале двадцать первого века большинство работ, посвященных проектированию и разработке систем регулирования транспортных потоков, основывалось на внедрении специализированных контроллеров [3], позволяющих оценивать обстановку на дорожном полотне в режиме реального времени. Например, одним из первых ученых-исследователей, предложивших решение проблемы регулирования транспортных потоков при помощи каскада контроллеров, является А. Хеги совместно с группой других ученых. Работа А. Хеги [4] представленная в 2001 году являлась результатом многолетних исследований, проводимых в области модернизации и оптимизации процессов транспортного регулирования. Результатом подобных исследований выступила новая модель системы поддержки и принятия решений, призванная упростить и оптимизировать процессы протекающие в командных центрах управления дорожным трафиком в городах.

В конце 10-х годов 21 века, впервые предприняты попытки модернизации систем обеспечения функционирования светофоров, где в качестве основного подхода не применяется каскад контроллеров, установленных на различных участках проезжих частей. Стоит отметить: на данный момент большинство современных решений основывается на реализации комплексного подхода, включающего реализацию моделей анализа геоданных, применение множества датчиков, а также применением существующих или реализацией собственных интеллектуальной систем управления светофорных объектов [5–7].

Современные научно-исследовательские работы, посвященные решению представленной проблемы, в большей степени публикуются и реализовываются в иностранных государствах Европы или Северной Америки, однако на территории Российской Федерации также существуют некоторые успешные коммерческие проекты. Так, единственным успешным коммерческим решением, позволяющим решать проблему регулирования транспортных потоков, является отечественная система «Vissim2022» [8] компании PTV Partner. Данная система функционирует, основываясь на количестве проезжающих через виртуально наложенную линию участников дорожного движения, тем самым адаптируя светофорный объект к динамически изменяемому трафику, однако, существенным недостатком данного решения является отсутствие систем контроля направлений убывания и прибывания автомобилей, а также отсутствие адаптивного регулирования светофорных объектов в зависимости от интенсивности и максимально допустимого уровня пропускной способности дорожного полотна.

В работе [9] проводится обзорный анализ методов алгоритмизации регулирования светофоров при помощи моделей нечеткой логики. В последствии, автором представляется разработка соответствующей имитационной модели для дальнейшего определения уровня эффективности применения моделей нечеткого регулирования в сравнении с обычным функционированием светофором (фиксированное время фаз).

В работе [10] решение рассматриваемой проблемы основывается на применении технологии геоинформационных систем, гибридизированных с топологическими моделями. Применение подобного подхода позволяет осуществлять детальный и как следствие эффективный анализ дорожно-транспортной ситуации не только на некотором заданном участке, но и на более обширных участках дорожного пространства. Основная идея данного подхода заключается следующем: на основании расположения светофорных объектов осуществляется построение первичного графа, позволяющего оценить взаимосвязи между вершинами, и как следствие сформировать общее представление о дорожно-транспортной ситуации на определенной местности.

В работе [11] рассматривается пример использования методов нечетких графов, характерные особенности которых позволяют учесть специфические параметры, связанные с текущей обстановкой на проезжих частях. Как следствие, основываясь на анализе полученных данных, это позволяет корректировать тот или иной светофорный объект. Однако, невзирая на преимущества рассмотренной научной публикации, данная работа не содержит в себе сравнительный анализ классических и иных решений, и как следствие не позволяет полноценно оценить уровень эффективности подобных решений.

2. Темпоральные нечеткие графы. Основываясь на представленном кратком анализе литературных источников, стоит отметить, что некоторые исследователи представляли решение выявленной проблемы основываясь на методах нечетких графов, иные ученые предлагали решения, в основе которых заложены подходы нечеткой логики. Однако в 2020 году, многие исследователи в своих работах объединили нечеткие графы и нечеткую логику с целью получения нечеткого планирования фаз и динамического цикла таймингов для регулирования транспортных потоков на перекрестке.

Впрочем, данные исследования не учитывают тот факт, что некоторые вариативные параметры, получаемые в ходе анализа дорожно-транспортного движения, являются периодическими и способны повторяться в зависимости от тех или иных условий. Таким образом, возможность применения периодических нечетких графов является обоснованной и нуждающейся в проверке гипотезой.

Зачастую теория графов применяется с целью представления отношений между элементами, обладающими сложной структурой и различной природой, при этом, отношения между элементами являются постоянными и не меняются во времени. Подобного рода графы называются «статическими» (рис. 1).

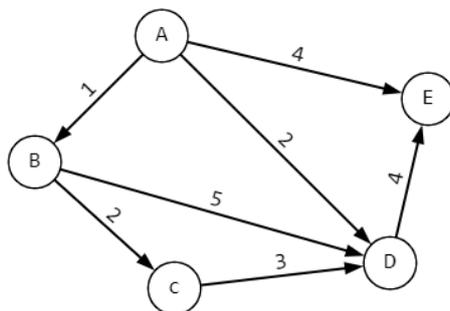


Рис. 1. Пример «статического» графа отношения объектов

Статический граф представляется совокупным множеством вершин и ребер, соединяющих указанные вершины, при этом, каждое ребро включает в себя весовой коэффициент, соответствующий типу отношений между вершинами, соединенных данным ребром. Однако, возможны ситуации, в которых отношения между элементами не только изменяются во времени, а являются циклическими, в таком случае, «статические» графы неприменимы для описания и моделирования [12].

Периодические нечеткие графы – графы, нечеткость которых изменяется в дискретное время, при этом, дискретное время обладает свойством цикличности [13]. Применение периодических временных моделей нечетких графов позволяет тождественно отражать типы неопределенностей, специфику взаимосвязей между моделируемыми объектами, возможные оптимизационные ограничения, а также решать задачи транспортировки потоков циклического типа, сетевого планирования и управления.

Периодическое расписание применимо для решения задач оптимизации транспортных потоков несколькими способами, выявления узких мест и зон перегруженности, с целью принятия целенаправленных мер, вычисления оптимальной синхронизации моделируемых объектов [14]. Кроме того, периодическое расписание применимо для моделирования и прогнозирования моделей транспортных потоков, что позволяет повысить эффективность планирования новых архитектурных проектов и как следствие улучшить транспортную инфраструктуру [15].

В настоящее время реализацией данного подхода является применение периодических временных графов, в которых связи между вершинами графов циклически изменяемы с течением времени. Такие графы обладают широкими перспективами для использования, однако невзирая на столь высокий уровень актуальности, разработка моделей для представления и использования периодических временных графов, учитывающих пространственные взаимосвязи между объектами, по нынешний день остается значимой и нуждающейся в реализации задачей [16].

Например, рассматривая темпоральные нечеткие графы, представленные на рисунке 2, можно констатировать, что темпоральный граф определяется следующими тремя параметрами $\tilde{G} = (X, \tilde{U}_t, T)$, где X – множество вершин графа с числом вершин равным $|X| = n$; T – множество натуральных чисел, определяющих дискретное время и равное: $T = \{1, 2, \dots, N\}$; $\tilde{U}_t = \{ \langle \mu_t(x_i, x_j) / (x_i, x_j) \rangle \}$ – нечеткое множество вершин, где $(x_i, x_j) \in X$, $\mu_t(x_i, x_j) \in [0, 1]$ является значением функции принадлежности μ_t для ребер (x_i, x_j) во время $t \in T$. Более того, в разные моменты времени для одного и того же ребра (x_i, x_j) , значения функции принадлежности, как правило, различны.

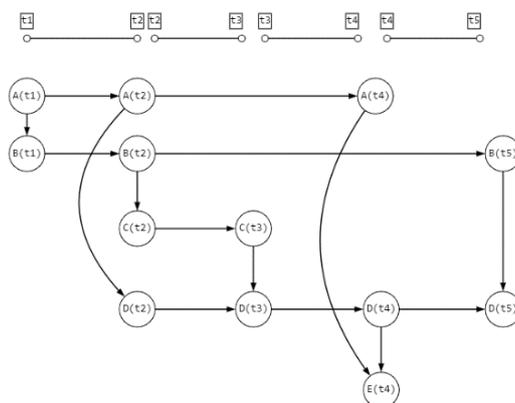


Рис. 2. Пример «темпорального» графа отношений

Так же, необходимо рассмотреть развернутый во времени вариант графа для периода равного p интервалам времени $G_p = (X_p, A_p)$, где множество вершин X_p определяется в соответствии с уравнением (1):

$$X_p = \{x_i: x \in X, i = 1, 0, \dots, p\}, \quad (1)$$

при этом множество дуг A_p , определяется в соответствии с уравнением (2):

$$A_p = \{(x_j): (x) \in A, j = 1, 0, \dots, p - z(x_i, x_j), j = i + z(x_i, x_j)\}, \quad (2)$$

где $z(x_i, x_j)$ – время прохождения потока по дуге $(x_i, x_j) \in A$.

Здесь множество вершин X_p формируется исходя из множества X , где каждая вершина дублируется p раз для всякого момента времени в рассматриваемом периоде [17]. Представим граф $G = (X, A)$, описывающий транспортную сеть, следующим образом (рис. 3).

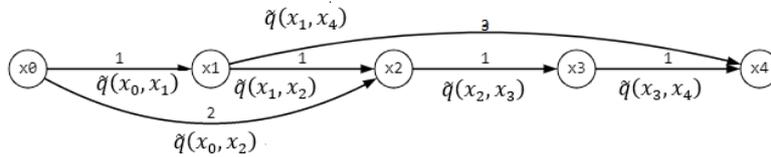


Рис. 3. Граф, описывающий транспортную сеть

Тогда, каждой дуге (x_i, x_j) приписаны два параметра: пропускная способность дуги (расположена над дугой), представленная в виде нечеткого числа, а также количество моментов времени, необходимых для прохождения потока по данной дуге (расположены под дугой). Предполагается, что пропускные способности для каждой дуги равны во всех моментах времени [14]. В графе, представленном на рисунке 3 пропускные способности представляют собой интервалы, определяемые формулами 3–5:

$$\tilde{q}(x_0, x_1) = [q_1(x_0, x_1); q_r(x_0, x_1)], \tilde{q}(x_1, x_2) = [q_1(x_1, x_2); q_r(x_1, x_2)], \quad (3)$$

$$\tilde{q}(x_2, x_3) = [q_1(x_2, x_3); q_r(x_2, x_3)], \tilde{q}(x_3, x_4) = [q_1(x_3, x_4); q_r(x_3, x_4)], \quad (4)$$

$$\tilde{q}(x_0, x_2) = [q_1(x_0, x_2); q_r(x_0, x_2)], \tilde{q}(x_1, x_4) = [q_1(x_1, x_4); q_r(x_1, x_4)]. \quad (5)$$

Таким образом, для графа, представленного на рисунке 3, развернутый во времени граф G_p будет обладать иной структурой, продемонстрированной на рис. 4. Данная структура формируется исходя из исходного графа (см. рис. 3) развернутого во времени для периода в p интервалов, где $p = 6$.

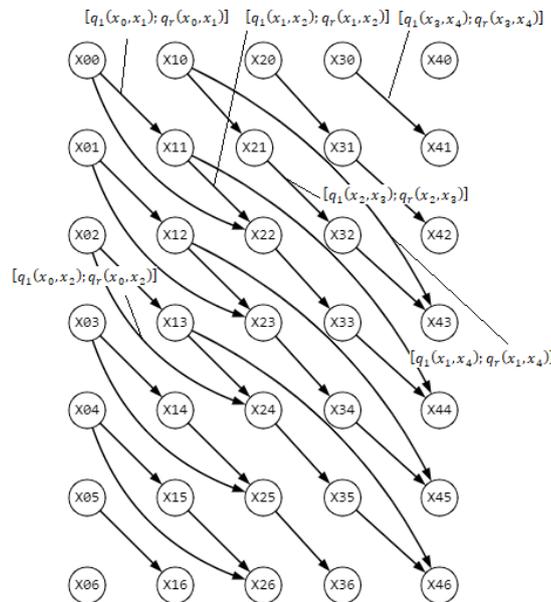


Рис. 4. Развернутый во времени вариант исходного графа для периода в 6 интервалов времени

В таком случае, в графе G_p вершины x_i и x_j соединяются дугой (x_i, x_j) , при условии, что в исходном графе $G = (X, A)$, поток способен преодолеть расстояние из вершины x_i в вершину x_j за время равное $(j - i)$. Например, единица потока, выходящая из вершины x_i в момент времени 3 и затрачивающая при прохождении по дуге (x_i, x_j) 7 единичных интервалов времени, способна представляться в графе G_p единицей потока, проходящей по дуге (x_3, x_{10}) . При этом пропускные способности дуг в развернутом во времени графе, (см. рис. 4), задаются в соответствии с уравнениями 6-11:

$$\tilde{q}(x_{0_i}, x_{1_{i+1}}) = [q_1(x_{0_i}, x_{1_{i+1}}); q_r(x_{0_i}, x_{1_{i+1}})] = [q_1(x_0, x_1); q_r(x_0, x_1)], \quad (6)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{1_i}, x_{2_{i+1}}) = [q_1(x_{1_i}, x_{2_{i+1}}); q_r(x_{1_i}, x_{2_{i+1}})] = [q_1(x_1, x_2); q_r(x_1, x_2)], \quad (7)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{2_i}, x_{3_{i+1}}) = [q_1(x_{2_i}, x_{3_{i+1}}); q_r(x_{2_i}, x_{3_{i+1}})] = [q_1(x_2, x_3); q_r(x_2, x_3)], \quad (8)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{3_i}, x_{4_{i+1}}) = [q_1(x_{3_i}, x_{4_{i+1}}); q_r(x_{3_i}, x_{4_{i+1}})] = [q_1(x_3, x_4); q_r(x_3, x_4)], \quad (9)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{0_i}, x_{2_{i+1}}) = [q_1(x_{0_i}, x_{2_{i+1}}); q_r(x_{0_i}, x_{2_{i+1}})] = [q_1(x_0, x_2); q_r(x_0, x_2)], \quad (10)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 2;$$

$$\tilde{q}(x_{1_i}, x_{4_{i+1}}) = [q_1(x_{1_i}, x_{4_{i+1}}); q_r(x_{1_i}, x_{4_{i+1}})] = [q_1(x_1, x_4); q_r(x_1, x_4)]. \quad (11)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 3;$$

Так как всякий динамический поток эквивалентен статистическому потоку в развернутом во времени графу G_p , то максимальный динамический поток за p интервалов времени, определяется при помощи алгоритма, подобного алгоритму Форда-Фалкерсона [18], однако, если значение p велики, то размерность графа G_p существенно возрастает, следовательно, пропорционально возрастет и количество вычислений, необходимых для определения максимального потока в графе [19, 20].

3. Периодические нечеткие графы. Периодичность – циклическая повторяемость какого-либо явления в заданные интервалы времени. Наиболее характерными явлениями периодичности выступают: фазы Луны, сменяемость дня и ночи и т. п. Свет, звук, тепло, радиоволны, переменный электрический ток также представляют колебательные, периодические процессы.

В рамках рассматриваемой области: транспортных потоков и сетей, учеными представлено множество вариантов представления и определения графов, обладающих различными показателями пропускной способности. Зачастую стандартные графы транспортных сетей выглядят следующим образом (рис. 5).

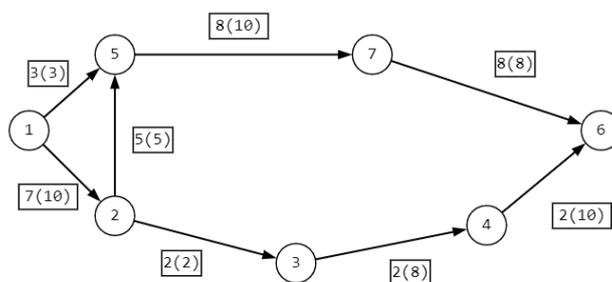


Рис. 5. Пример графа потоков и живучести в транспортных сетях

В рамках определения периодических графов, стоит отметить их отличительные характеристики в сравнении с классическими графами, а именно: инициализация пропускной способности, совместно с заданием времени повторения (тактами), а также возможностью определения количества задержек на той или иной вершине. Подобные возможности позволяют классифицировать данные графы в качестве темпоральных. Пример данного графа представлен на рис. 6.

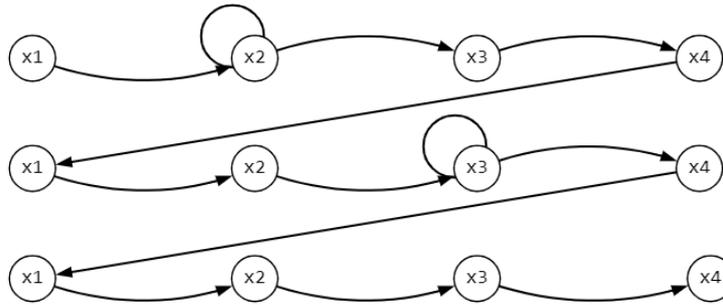


Рис. 6. Пример периодического нечеткого графа

Исходя из особенностей рассмотренных графов, стоит отметить возможность повтора итераций бесконечное множество раз, в случае отсутствия заданного ограничения. Следовательно, во избежание возникновения подобной ситуации, задаются следующие ограничения во времени (тактах): $t = 6$. Данное ограничение предполагает окончание прохождения через $t = 6$, соответственно, при достижении данного значения, необходимо сформировать максимально возможное количество выходных значений равных U . Данный периодический темпоральный граф с прохождением тактов с задержкой в вершине, представляется следующим образом: пусть в графе G вершины x_i и x_j соединяются дугой (x_i, x_j) , при условии, что в исходном графе $G = (X, A)$, пропускная способность x_i в вершину x_j за время равное $t = 1$, равна q . Например, пропускная способность вершины x_i по дуге (x_i, x_j) в момент времени 1 обладает значением, равным 3, способна представляться в графе G единицей потока, проходящей по дуге (x_1, x_2) .

При этом мы видим, что в вершине x_2 у нас идет задержка и мы ждем следующего периода, чтобы из этой вершины пойти дальше. При этом пропускные способности дуг в развернутом во времени графе с учетом задержек, задаются в соответствии с уравнениями (12)-(14):

$$\tilde{q}(x_{0i}, x_{1i+1}) = [q_1(x_{0i}, x_{1i+1}); q_r(x_{0i}, x_{1i+1})] = [q_1(x_0, x_1); q_r(x_0, x_1)], \quad (12)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) = [q_1(x_{1i}, x_{2i+1}); q_r(x_{1i}, x_{2i+1})] = [q_1(x_1, x_2); q_r(x_1, x_2)],$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

$$\tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) = \begin{cases} U_i + U_{i+1}, & \text{если } \tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) > \max \tilde{q} \\ U_i, & \text{если } \tilde{q}(x_{1i}, x_{2i+1}) \leq \max \tilde{q} \end{cases}, \quad (13)$$

$$t + 1$$

$$\tilde{q}(x_{2i}, x_{3i+1}) = [q_1(x_{2i}, x_{3i+1}); q_r(x_{2i}, x_{3i+1})] = [q_1(x_2, x_3); q_r(x_2, x_3)], \quad (14)$$

$$\forall_i = 0, \dots, p - 1;$$

Исходя из формулы (13) стоит внести пояснения: в случае если пропускная способность вершины 2 больше максимальной пропускной способности, осуществляется задержка, с последующим аккумулярованием выходных значений и с переходом на новую итерацию цикла. В случае, если пропускная способность вершины окажется меньше или равной максимальному значению, итерация цикла продолжается.

4. Применение. Рассматриваемая технология является совершенно новой и не обладает какими-либо разработками в данном направлении, в связи с чем, определить эффективность представленного подхода, применительно к решению существующих прикладных задачах достаточно проблематично. В настоящее время осуществляется сбор информации, необходимой для проектирования представленной технологии, на примере города Таганрог, Ростовской области. В частности, проводится аккумулярование данных четырех последовательных участков пересечения дорог по улице Александровская. Вышеперечисленные участки дороги представлены на рис. 7.

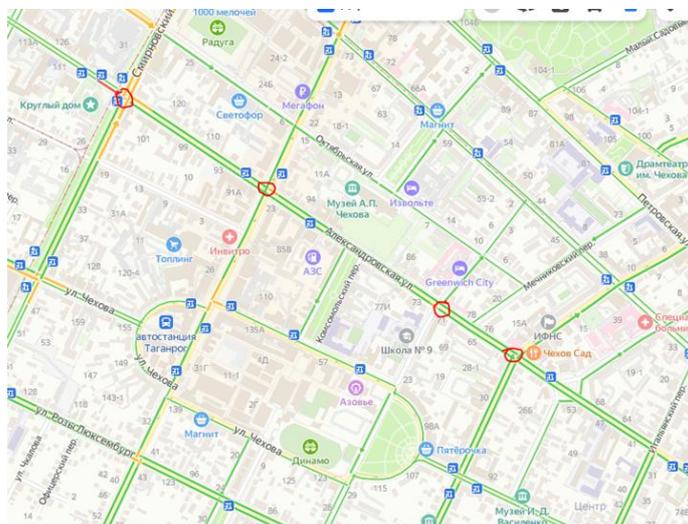


Рис. 7. Пример периодического темпорального графа

Данные полученные при помощи сбора информации позволяют сформировать следующие основные блоки вариативных параметров: геометрию дороги, объемы дорожного трафика, время отображения зеленого сигнала, а также периоды цикла работы светофорных объектов. Геометрия дороги и объем дорожного движения являются входными данными для предлагаемых алгоритмов, в то время как иные параметры предназначены для проведения сравнительного анализа.

Процесс сбора информации осуществляется за счет специализированного оборудования: цифровой камеры и камеры замкнутого телевидения (ССТV). При этом объемы дорожного движения планируется подсчитывать при помощи анализа видеозаписей с последующей ручной классификацией транспортных средств. С целью формирования наиболее объективной информационной базы фиксация дорожного потока осуществляется в наиболее загруженные интервалы времени.

Также, в рамках представленной работы под периодичностью понимаются циклы, происходящие на указанных перекрестках (см. рис. 6):

- ◆ Ежедневный цикл – возникает, во время преодоления пути с работы и на работу с понедельника по пятницу.

- ◆ Еженедельный цикл – то, что не поддается изменению каждую неделю, т.е. в данном случае – это утро и день субботы и воскресения, т.к. рядом находится «центральный» рынок.
- ◆ Ежегодный цикл – все праздники, при которых перекрывают главные улицы города, тем самым перегружая другие дороги.

Заключение. Подводя итоги данной работы, стоит отметить следующие основные положения. На данный момент системы регулирования транспортными потоками актуальная и очень важная задача, нуждающаяся в эффективном решении. Существующие системы, разработанные в Российской Федерации, не отвечают сложившимся критериям и нуждаются в значительной доработке. Анализ литературных источников продемонстрировал актуальность применения методов и подходов основанных на теории нечетких множеств, что в свою очередь свидетельствует об актуальности ведения исследований в данном направлении. В качестве основного подхода для решения поставленной задачи, предлагается использование периодических темпоральных нечетких графов. Данная технология является совершенно новой и на данный момент не обладает какими-либо программными или алгоритмическими реализациями в рассматриваемой области исследования. Информация, представленная в данной работе, носит теоретический характер, позволяя определить целостное представление о характерных особенностях периодических темпоральных нечетких графах, а также сформировать основной теоретический базис, необходимый для дальнейших исследований в данной области.

Подтверждения. Исследование было профинансировано Российским научным фондом, проект № 23-21-00206, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00206> / реализовано Южным федеральным университетом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Говердовская Л.Г., Павлов Д.С.* Умный светофор // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 73-2. – С. 91-94.
2. *Кадыров А.С., Токашева Н.С.* Анализ и предложения по проблеме устранения автомобильных пробок (дорожных заторов) // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – No. 22. – P. 69-72.
3. *Chien C.C., Zhang Y., Lai M.* Regulation layer controller design for automated highway systems // Mathematical and Computer Modelling. – 1995. – Vol. 22, No. 4-7. – P. 305-327.
4. *Hegy A., Schutter B.D., Hoogendoorn S., Babuska R., Zuylen H., Schuurman H.* A fuzzy decision support system for traffic control centers // Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC'01). Oakland, 2001. – P. 358-363.
5. *Alhamwi A., Medjroubi W., Medjroubi T., Agert, C.* GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas // Appl. Energy. – 2017. – 191. – P. 1-9.
6. *Belyakov, S., Bozhenyuk, A., Samoylov, L., Nikashina, P.* Geoinformation Model for Smart Grid Sustainability Management // Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 759. – P. 651-658.
7. *Umare, P.R.; Jayswal, S.G.; Tambakhe, S.R.; Upadhye, P.D.; Gulhane, N.D.* Smart Solution for Traffic Control // In Proceedings of the 2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). – 2019. – P. 721-724.
8. *Kutlimuratov K., Khakimov S., Mukhitdinov A., Samatov R.* Modelling traffic flow emissions at signalized intersection with PTV vissim // Международная научная конференция «Строительная механика, гидравлика и гидротехника». – 2021. – С. 12.
9. *Kartikasari R.* Optimization of Traffic Light Control Using Fuzzy Logic Sugeno Method // International Journal of Global Operations Research. – 2020. – P. 51-61.
10. *Цветкова В.Ю.* Корреляционный анализ и оппозиционные переменные // Европейский журнал естественной истории. – 2014. – С. 56-58.

11. Bershtein L.S., Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N. Routing in the conditions of uncertainty with the use of fuzzy temporal graphs // *Life Sci Journal*. – 2014. – No. 11 (7). – P. 182-186.
12. Gorbachev S., Bozhenyuk A., Nikashina P. Optimization of Traffic Flow Based on Periodic Fuzzy Graphs // S. Bhattacharyya et al. (Eds.): *Intelligent Human Centered Computing. Human 2023*, Springer Tracts in Human-Centered Computing (STHC). – 2023. – P. 374-383. – https://doi.org/10.1007/978-981-99-3478-2_32.
13. Афанасьева Т.В., Наместников А.М., Перфильева И.Г., Романов А.А., Ярушкіна Н.Г. Прогнозирование временных рядов: нечеткие модели. – Ульяновск. 2014. – 145 с.
14. Bozhenyuk A.V., Kosenko O., Knyazeva M., Dolgiy A. The Comparative Approach to Solving Temporal-Constrained Scheduling Problem Under Uncertainty // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2021. – P. 173-183.
15. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Kaymak U. Managing temporal uncertainty in multi-mode Z-number fuzzy graph structures // In: *Proceedings of the 11th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2019*. – 2020. – P. 580-587.
16. Bozhenyuk A., Belyakov S., Gerasimenko E., Savelyeva M. Fuzzy optimal allocation of service centers for sustainable transportation networks service // *Intelligent Systems Reference Library*. – 2017. – Vol. 113. – P. 415-437.
17. Çakır E., Ulukan Z., Acarman T. Shortest Fuzzy Hamiltonian Cycle on Transportation Network Using Minimum Vertex Degree and Time-dependent Dijkstra's Algorithm // In: *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. IFAC-PapersOnLine*. Lille, France. – 2021. – Vol. 54 (2). – P. 348-353.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. – 2nd ed. – London: MIT Press, 2011. – 1296 p.
19. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Kacprzyk J., Rozenberg I. *Flows in Networks Under Fuzzy Conditions* // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. – Springer International Publishing, 2017. – 168 p.
20. Гуреев П.М., Гришин В.Н. Циклы: от истоков до наших дней // *Вестник ГУУ*. – 2014. – С. 99-106.

REFERENCES

1. Goverdovskaya L.G., Pavlov D.S. Umnyy svetofor [Smart traffic light], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], 2021, No. 73-2, pp. 91-94.
2. Kadyrov A.S., Tokasheva N.S. Analiz i predlozheniya po probleme ustraneniya avtomobil'nykh probok (dorozhnykh zatorov) [Analysis and proposals on the problem of eliminating traffic jams (traffic congestion)], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2014, No. 22, pp. 69-72.
3. Chien C.C., Zhang Y., Lai M. Regulation layer controller design for automated highway systems, *Mathematical and Computer Modelling*, 1995, Vol. 22, No. 4-7, pp. 305-327.
4. Hegyi A., Schutter B.D., Hoogendoorn S., Babuska R., Zuylen H., Schuurman H. A fuzzy decision support system for traffic control centers, *Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC'01)*. Oakland, 2001, pp. 358-363.
5. Alhamwi A., Medjroubi W., Medjroubi T., Agert C. GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas, *Appl. Energy*, 2017, 191, pp. 1-9.
6. Belyakov S., Bozhenyuk A., Samoylov L., Nikashina P. Geoinformation Model for Smart Grid Sustainability Management, *Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, Vol. 759, pp. 651-658.
7. Umare P.R., Jayswal S.G., Tambakhe S.R., Upadhye P.D., Gulhane N.D. Smart Solution for Traffic Control, In *Proceedings of the 2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, 2019, pp. 721-724.
8. Kutlimuratov K., Khakimov S., Mukhitdinov A., Samatov R. Modelling traffic flow emissions at signalized intersection with PTV vissim, *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Stroitel'naya mekhanika, gidravlika i gidrotekhnika»* [International scientific conference "Building mechanics, hydraulics and hydraulic engineering"], 2021, pp. 12.

9. Kartikasari R. Optimization of Traffic Light Control Using Fuzzy Logic Sugeno Method, *International Journal of Global Operations Research*, 2020, pp. 51-61.
10. Tsvetkova V.Yu. Korrelyatsionnyy analiz i oppozitsionnye peremennye [Correlation analysis and opposition variables], *Evropeyskiy zhurnal estestvennoy istorii* [European Journal of Natural History], 2014, pp. 56-58.
11. Bershtein L.S., Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N. Routing in the conditions of uncertainty with the use of fuzzy temporal graphs, *Life Sci Journal*, 2014, No. 11 (7), pp. 182-186.
12. Gorbachev S., Bozhenyuk A., Nikashina P. Optimization of Traffic Flow Based on Periodic Fuzzy Graphs, S. Bhattacharyya et al. (Eds.), *Intelligent Human Centered Computing. Human 2023, Springer Tracts in Human-Centered Computing (STHC)*, 2023, pp 374-383. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3478-2_32.
13. Afanas'eva T.V., Namestnikov A.M., Perfil'eva I.G., Romanov A.A., YArushkina N.G. Prognozirovanie vremennykh ryadov: nechetkie modeli [Time series forecasting: fuzzy models], Ulyanovsk. 2014, 145 p.
14. Bozhenyuk A.V., Kosenko O., Knyazeva M., Dolgiy A. The Comparative Approach to Solving Temporal-Constrained Scheduling Problem Under Uncertainty, *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, pp. 173-183.
15. Knyazeva M., Bozhenyuk A., Kaymak U. Managing temporal uncertainty in multi-mode Z-number fuzzy graph structures, In: *Proceedings of the 11th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2019, 2020*, pp. 580-587.
16. Bozhenyuk A., Belyakov S., Gerasimenko E., Savelyeva M. Fuzzy optimal allocation of service centers for sustainable transportation networks service, *Intelligent Systems Reference Library*, 2017, Vol. 113, pp. 415-437.
17. Çakır E., Ulukan Z., Acarman T. Shortest Fuzzy Hamiltonian Cycle on Transportation Network Using Minimum Vertex Degree and Time-dependent Dijkstra's Algorithm, In: *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. IFAC-PapersOnLine*. Lille, France, 2021, Vol. 54 (2), pp. 348-353.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. introduction to algorithms. 2nd ed. London: MIT Press, 2011, 1296 p.
19. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Kacprzyk J., Rozenberg I. Flows in Networks Under Fuzzy Conditions, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer International Publishing, 2017, 168 p.
20. Gureev P.M., Grishin V.N. Tsikly: ot istokov do nashikh dney [Cycles: from the origins to the present day], *Vestnik GUU* [Bulletin of the State University of Management], 2014, pp. 99-106.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Е. Сергеев.

Никашина Полина Олеговна – Южный федеральный университет; e-mail: nikashina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79381453823; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Берштейна Л.С.; ассистент.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; тел.: +78634371743; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Берштейна Л.С.; д.т.н.; профессор.

Nikashina Polina Olegovna – Southern Federal University; e-mail: nikashina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79381453823; the department of information and analytical security systems named after professor Bershtein L.S.; assistant.

Bozhenyuk Alexander Vitalievich – e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; phone: +78634371743; the department of information and analytical security systems named after professor Bershtein L.S.; dr. of eng. sc.; professor.