11. The Brain as an Information Processing System Woody Allen. http://www.willamette.edu/~gorr/classes/cs449/brain.html
12. Память. http://www.ru.wikipedia.org/wiki/память.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Пашаев Ариф Мир Джалал оглы – Национальная академия авиации Азербайджана (г. Баку); e-mail: mail@naa.edu.az; AZ1045, г. Bakı, пос. Bina, 25 km.; ректор; д.ф.-м.н.; академик АН Азербайджанской республики.

Султанов Валерий Зейнатдинович – e-mail: office@azans.az; зав. кафедрой аэронавигации; доктор философии по технике.

Набиев Расим Насиб оглы – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; д.т.н.; начальник отдела авиационной электроники НИИ ТАП.

Искендеров Ислам Асад оглы – e-mail: islam.nus@mail.ru; зав. кафедрой «Авионика»; к.ф.-м.н.; доцент.

Бабаев Гусейн Баба оглы – e-mail: texzal@gmail.com; руководитель АС УВД, инженер по радионавигации, ЦЭРТОС и АС УВД, управления воздушного движения «Азераэронавигация».

Pashaev Arif Mir Jalal Ogli – National Aviation Academy of Azerbaijan (Baku city); e-mail: mail@naa.edu.az; AZ1045, Baku city, Pos Bina; rector; Academician of the Academy of Sciences of Azerbaijan Republic.

Sultanov Valeri Zeinadinovich – e-mail: office@azans.az; head of department of Aerodynamics; PhD.

Nabiev RAsim Nasib Ogli – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; dr. of eng. sc.; chief of Electronic Aviation National Aviation Academy of Azerbaijan.

Iskanderov Islam Asad Ogli – e-mail: islam.nus@mail.ru; head of department Aveonica; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Babaev Gusein Baba Ogli – e-mail: texzal@gmail.com; radionavigation engener, Air traffic control, Aviation National Aviation Academy of Azerbaijan.

УДК 681.3:519.168

С.Л. Беляков, А.В. Боженюк

ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ В УПРАВЛЕНИИ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ*

Анализируются особенности применения графовых моделей при решении задач управления цепями поставок. Рассматриваются подходы к анализу темпоральных графов, описывающих цепи поставок. Вводится понятие синхронного дерева кратчайших путей. Приведены соотношения для оценки сложности алгоритма построения кратчайшего пути в графе, состоящем из совокупности деревьев кратчайших путей. Обсуждаются особенности представления сложных транспортных сетей экспертными знаниями в среде геоинформационных систем.

Нечеткий темпоральный граф; синхронное дерево кратчайших путей; геоинформационные системы; время достижимости; степень связности вершин графа; маршрутизация.

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-01-00032-а,11-01-00011-а.

S.L. Beliakov, A.V. Bozhenyuk

GRAPH MODELS IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT ENERGY RESOURCES

This paper analyzes the features of the application of graph models in solving the problems of supply chain management. The approaches to the analysis of temporal graphs describing the supply chain. Introduce the concept of simultaneous shortest path tree. Are to assess the relation of the algorithm for constructing the shortest path in the graph, which consists of a set of shortest path tree. The peculiarities of representation of complex transport networks expertise in geographic information systems environment.

Fuzzy temporal graph;synchronous shortest path tree; geographic information systems; while the feasibility; the degree of connectivity of vertices; routing.

Управление цепями поставок энергоносителей является предметом исследования на стыке ряда областей знаний от экономики, юриспруденции до компьютерных наук и математики [1]. Цепи поставок (SCM) в общем случае являются сложными системами, описывающими баланс информационных, финансовых, материальных потоков в процессе создания, потребления и утилизации продукции. Сложность SCM определяется несколькими факторами:

- разнородностью элементов и связей. Цепи поставок включают в себя как реальные объекты окружающего мира, так и виртуальные объекты искусственных миров;
- динамичностью. Поведение отдельных объектов SCM определяется внешней средой. Существенны как воздействия природного характера, так и субъективные влияния личностей и коллективов, Все воздействия труднопредсказуемо изменяются во времени;
- неполнотой данных об элементах и связях CSM.

Глобальной целью управления CSM энергоносителей является минимизация издержек на создание и потребление энергии. Данная цель достигается через реализацию совокупности локальных целей, связанных с различными аспектами представления CSM. Например, могут ставиться задачи оценивания рынков, анализа логистических каналов поставки, минимизации запасов, обеспечения максимальной надежности исполнения обязательств поставки, утилизации отходов и минимизации воздействия на окружающую среду. Формально и содержательно задачи управления, как можно видеть, значительно разнятся. Это создает дополнительные трудности в решении глобальной задачи и делает актуальным разработку средств информационной поддержки, которые бы интегрировали инструменты принятия решений.

Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является использование геоинформационных систем (ГИС). Эта перспективность, с нашей точки зрения, определяется двумя основными факторами:

- картографирование CSM дает образное представление системы, столь необходимое при решении сложных трудноформализуемых задач человеком;
- интеллектуальные программные компоненты ГИС позволяют решать не полностью формализованные задачи, осуществлять поиск информации и накапливать опыт решения практических проблем [2, 3].

В данной работе обсуждается ряд аспектов применения графовых моделей в среде ГИС для оптимизации цепей поставок энергоносителей.

Многие задачи управления цепями поставок решаются с привлечением аппарата темпоральных графов [3]. Отличительной особенностью темпорального графа

$$G = (X, U, T)$$

с множеством вершин X и ребер U является наличие параметра времени T. Время задается бесконечной в общем случае последовательностью дискретных значений

$$T = (t_0, t_1, t_2, ..t_M ...),$$

каждому из которых соответствует изменение состояния графа – числа его вершин и весов ребер. На каждом интервале

$$\Delta t_i = (t_{i-1}, t_i), i = 1,2,...$$

граф является статическим. Таким образом, темпоральный граф можно рассматривать как бесконечную последовательность графов

$$G = (G_{\Delta t_1}, G_{\Delta t_2}, ...) .$$

Любые задачи анализа и синтеза темпоральных графов предполагают указание временного интервала анализа Δt_A. Трудоемкость Q поиска решения поставленной задачи (в числе операций) при этом увеличивается, как минимум, в *L* раз:

$$Q(G_{\Delta t_A}) \geq LQ(G_{\Delta t_i}),$$

где *L* есть число графов из последовательности G, временные интервалы которых покрывают анализируемый временной интервал:

$$\forall \Delta t_i \subseteq \Delta t_A, i = \overline{1, L} .$$

Например, чтобы анализировать характер изменения хроматического числа $C(t)$ темпорального графа, необходимо определить совокупность значений

$$C(\Delta t_i), i = \overline{1, L} .$$

Вместе с тем, использование структурных особенностей темпорального графа, алгоритмов анализа и синтеза позволяет сократить трудоемкость расчетов.

Рассмотрим это на примере задачи построения кратчайшего маршрута в темпоральном графе. Данная задача чрезвычайно часто решается при управлении цепями поставок на уровне логистической поддержки [1].

Как известно [3], кратчайшим путем в статическом графе является последовательность ребер минимального суммарного веса между заданной парой вершин *A* и *B*. Предполагается, что вершина *B* достижима из вершины *A*. Кратчайший путь P_{AB} является темпоральным подграфом

$$P_{AB} \subset G,$$

который может строиться двумя способами. Каждый из способов по сути следует из различных постановок задачи. Первая постановка – кратчайшие пути связываются независимо с каждым интервалом времени $\Delta t_i, i = 1, 2, ...$. Решением является последовательность

$$P_{AB}(\Delta t_i), i = 1,2,...$$

Подобная постановка задачи маршрутизации возникает, например, при стратегическом планировании цепей поставок. Интервалы времени $\Delta t_i, i = 1, 2, ...$ либо не связаны с перемещением объектов, либо достаточно велики для того, чтобы перемещение происходило внутри интервала, не затрагивая его границ.

Вторая постановка задачи состоит в том, что веса дуг ассоциируются с временем перемещения объекта из одной вершины в другую и кратчайший путь является минимальным временем перемещения из вершины *B* в вершину *A*. Очевидно, что кратчайший путь зависит от заданного интервала Δt_{AB}. Его положение на временной оси и ширина определяет различные решения. Количество возможных решений ограничивается достижимостью вершины *B* из вершины *A*. Термин «достижимость» трактуется нестандартно, поскольку связан с абстракцией перемещения по графу в течение заданного временного интервала.

Вопросы нестандартной достижимости в графах исследовались в работах авторов [5]. Для получения решения задачи поиска кратчайшего маршрута авторами предлагается строить вспомогательный статический граф, отражающий все возможные варианты достижимости вершин. Поскольку вспомогательный граф имеет большее, чем в исходном, число вершин и ребер, сложность его анализа безусловно выше. Если учесть, что число различных интервалов $\Delta t_i, i = \overline{1, L}$ быстро растет с увеличением *L*, трудоемкость поиска решения задачи так же растет быстро [5].

Возможным путем снижения трудоемкости может оказаться использование свойств стационарности дерева кратчайших путей в темпоральном графе. Как известно [4], с помощью алгоритма Флойда в статическом графе может быть построено дерево кратчайших путей. Для темпорального графа дерево кратчайших путей также является темпоральным, т.е.

$$T_G(\Delta t) \subseteq G.$$

Будем считать дерево кратчайших путей стационарным, если с течением времени его структура не меняется:

$$\forall \tau_1, \tau_2 \in \Delta t, \forall x_i, x_j \in : T_G(\Delta t) : u(x_i, x_j) \in T_G(\tau_1) \Rightarrow u(x_i, x_j) \in T_G(\tau_2) \ \& \\ \forall u(x_i, x_j) \in T_G(\tau_2) \Rightarrow u(x_i, x_j) \in T_G(\tau_1)$$

Здесь τ_1, τ_2 – любая пара временных интервалов, вложенных в интервал Δt. Стационарность позволяет на любом вложенном интервале определять кратчайший путь в дереве без построения вспомогательного графа, ограничиваясь арифметическим подсчетом длины пути с учетом переменной скорости перемещения по ребрам. Поскольку дерево кратчайших путей строится для заданного интервала один раз, поиск кратчайшего пути не сложнее, чем поиск кратчайшего пути в стационарном графе.

На практике темпоральные графовые модели со стационарным деревом кратчайших путей встречаются достаточно часто. Причем наиболее типична ситуация, когда общий темпоральный граф состоит из подграфов со стационарными деревьями. Например, поведение сети поставки энергоносителей населенного пункта описывается экспертами как совокупность связанных подсетей, каждая из которых имеет собственную, не похожую на остальные подсети динамику. Пропускные способности отдельных участков сети (веса ребер графа) изменяются практически синхронно из-за стремления любой сети поставки перейти в равновесное состояние. Следует предполагать, что описываемая ситуация является не только следствием особой организации мышления эксперта, но и свойством самоорганизующейся сети поставки энергоносителей: флуктуации ее пропускной способности всегда носят локальный характер.

Рассмотрим, насколько изменяется сложность поиска кратчайшего пути в темпоральном графе, состоящем из подграфов со стационарными деревьями кратчайших путей. Проанализируем случай двух смежных деревьев, все вершины которых достижимы на заданном интервале времени. Обозначим через $B_{G_1G_2}$ множество вершин, образующих границу между подграфами G_1 и G_2 (рис. 1). Можно показать, что путь из $A \in G_1$ в $B \in G_2$ потребует сравнения $|B_{G_1G_2}|$ путей из вершины *A* в вершины $B_{G_1G_2}$ в подграфе G_1 и такого же числа путей из вершин $B_{G_1G_2}$ в вершину *B*. Таким образом, сложность нахождения кратчайшего пути линейно зависит от числа вершин границы между подграфами.

Если подграфы $G_1, G_2, ...G_N$ связаны в цепь (рис. 2), и $A \in G_1$, а $B \in G_N$, то число вариантов путей составляет

$$V = B_{G_1 G_2} + \sum_{i=1}^{N-2} B_{G_i G_{i+1}} B_{G_{i+1} G_{i+2}} + B_{G_{N-1} G_N}.$$

Если обозначить через n среднее число вершин границ графов, то можно видеть, что сложность перебора вариантов составляет $O(n^2)$.

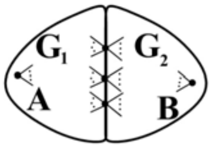

Рис. 1. Граница у пары графов

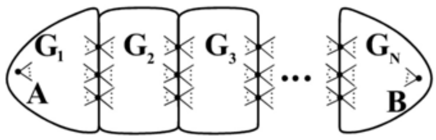

Рис. 2. Границы в цепочечном графе

Наконец, если подграфы $G_1, G_2, ...G_N$ связаны друг с другом произвольным образом, $A \in G_1$, $B \in G_N$, то поиск кратчайшего пути потребует нахождения кратчайшего пути в графе $\tilde{G}$, вершины которого соответствуют подграфам, а ребра – вершинам границы. Для этого может использоваться алгоритм Дейкстры [5].

На рис. 4 показан пример графа $\tilde{G}$, который строится на основе схемы зонирования сети поставки (рис. 3). Каждая зона на карте ограничивает участок транспортной сети, который, с точки зрения эксперта, обладает стационарностью поведения на отдельных временных интервалах. Стационарность касается дерева кратчайших путей. Точки на схеме (рис. 3) соответствуют узлам транспортной сети. Граф на рис. 4 описывает возможные пути перемещения из одной подсети в другую.

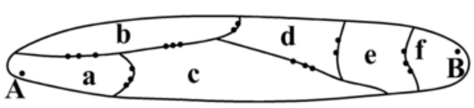

Рис. 3. Схема зонирования

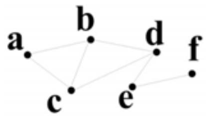

Рис. 4. Граф связей

Как известно [4], трудоемкость решения задачи маршрутизации оценивается как $O(n^2)$, где – n число вершин графа. Следовательно, разбиение графа на подграфы с меньшим числом вершин позволяет понизить общую трудоемкость решения, если последующая «сборка» общего решения не сложнее $O(n^2)$. Таким образом, свойство стационарности деревьев кратчайших расстояний дает возможность значительно снизить сложность поиска кратчайшего пути в темпоральном графе, если граф может быть представлен небольшим числом слабо связанных подграфов со стационарными деревьями. Таким условиям вполне соответствуют экспертные описания транспортных сетей реального мира.

Подводя итог, следует заключить, что применение темпоральных графовых моделей для управления цепями поставок сдерживается сложностью алгоритмов анализа и синтеза временных последовательностей графов. Вместе с тем, реальный мир далеко не всегда отражается моделями самого общего вида. Неполнота, неточность, недоопределенность данных заставляет использовать экспертные данные в качестве основного источника сведений о поведении элементов и связей цепей поставок. Экспертные представления о предметной области не могут быть очень сложными [6], поскольку прошли путь интуитивного обобщения и согласования с опытом. Соответственным образом должны строиться формальные модели поиска решений. В данной работе показана роль выделения и использования стационарных инвариантов графов – деревьев кратчайших путей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов Д.С.* Управление цепями поставок. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009.
2. *Розенберг И.Н., Беляков С.Л.* Программные интеллектуальные оболочки геоинформационных систем. – М.: Научный мир, 2010.
3. *Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Боженюк А.В.* Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 121-127.
4. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978.
5. *Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А.* Графы с вентильной достижимостью. Марковские процессы и потоки в сетях // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2003. – № 3. – С. 3-5.
6. *Люггер Д.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: Пер. с англ. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2005

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Е. Золотовский.

Беляков Станислав Леонидович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: beliacov@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371743; кафедра прикладной информатики; д.т.н.; профессор.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; кафедра прикладной информатики; д.т.н.; профессор.

Beliacov Stanislav Leonidovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: beliacov@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371743; the department of applied information science; dr. of eng. sc.; professor.

Bozhenyuk Alexandr Vitalievich – e-mail: avb002@yandex.ru; the department of applied information science; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.513

В.Х. Пшихопов, А.Р. Гайдук, М.Ю. Медведев, В.Е. Беляев, Н.К. Полуянович, Ю.П. Волощенко

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМИ ПРИВОДАМИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА*

Рассматривается задача оптимизации движения электроподвижного состава по критерию энергопотребления с использованием комплексной математической модели, включающей уравнения механического движения и уравнения электромеханического и электрических преобразователей энергии. Приводится методика планирования движения состава вдоль, пути, заданного прямолинейными отрезками различных наклонов. Методика демонстрируется численным примером. На базе комплексной модели строятся алгоритмы управления, реализующие заданную оптимального траекторию движения. Погрешности модели учитываются в системе управления путем оценивания возмущений в процессе движения.

Электроподвижный состав; энергосбережение оценивание возмущений.

* Работа поддержана грантом РФФИ № 12-08-13112-офи_м_РЖД.