

5. Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Долинов С.Н., Журавин Л.Г., Семенов Е.И., Фремке А.В. Адаптивные телеизмерительные системы/ Под ред. А.В. Фремке. – Л.: Энерго-издат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 248 с.
6. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – 7-е изд. – М.: Физматгиз, 2001. – 575 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

Кавчук Сергей Васильевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: s_v_k_k@mail.ru; 347922, г. Таганрог, Шевченко, 2; тел.: 88634360302; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; доцент.

Ткаченко Григорий Иванович – e-mail: griha33@yandex.ru; тел.: 89185159288; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; доцент.

Савченко Яна Сергеевна – e-mail: y.savchenko.mg12@mail.ru; тел.: 89612919810; кафедра информационных измерительных технологий и систем; магистрант.

Kavchuk Sergey Vasilyevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: s_v_k_k@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634360302; the department of informational measurement technologies and systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Tkachenko Grigory Ivanovich – e-mail: griha33@yandex.ru; phone: +79185159288; the department of informational measurement technologies and systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Savchenko Jana Sergeevna – e-mail: y.savchenko.mg12@mail.ru; phone: +79612919810; the department of informational measurement technologies and systems; master degree.

УДК 51-74

С.Л. Беляков, М.Л. Белякова, А.В. Боженюк, М.Н. Савельева

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ*

Рассматривается задача оптимизации потоков в механической транспортной системе за счет рационального выбора стратегии маршрутизации. Особенность постановки задачи состоит в том, что рассматривается комплекс факторов, зависящих от времени эксплуатации системы. Предполагается, что имеет место как изменение свойств самой системы, так и свойств транспортируемых грузов. Оптимизационный процесс базируется на экспертных знаниях. Предполагается, что эксперт, наблюдающий поведение системы, отображает свой опыт путем выделения в транспортной системе подсистем со специфическим поведением. Каждая подсистема отличается стабильностью временных характеристик транспортировки грузов. Стратегия оптимизации использует алгоритмы фиксированной и динамической маршрутизации. Для создания таблиц маршрутизации предлагается использовать модель нечеткого темпорального гиперграфа. Рассматриваются фиксированная и динамическая маршрутизация в условиях неопределенности поведения механической транспортной системы, предлагается модификация алгоритма Дейкстры для случая нечеткого темпорального гиперграфа. Делается вывод об эволюционном развитии систем рассматриваемого класса по мере накопления опыта их эксплуатации.

Механическая транспортная система; фиксированная маршрутизация; динамическая маршрутизация; нечеткий темпоральный гиперграф.

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 12-01-00032-а, 13-07-13103-офи_м_РЖД.

S.L. Belyakov, M.L. Belyakova, A.V. Bozhenyuk, M.N. Savelyeva

OPTIMIZATION OF FLOWS IN TRANSPORT SYSTEMS

We consider the problem of optimizing flows in mechanical transport system by rational choice routing strategy. Peculiarity of the problem lies in the fact that we are considering complex of factors, time-dependent exploitation of system. It is assumed that there is a change properties of the system and the properties of transported cargo. Optimization process is based on expert knowledge. Assumed that the expert observing the behavior of the system shows his experience by allocating in the transport system subsystems with a specific behavior. Each subsystem is stable temporal characteristics of transportation. Optimization strategy uses algorithms to fixed and dynamic routing. To create routing tables is proposed to use the model of fuzzy temporal hypergraph. We consider fixed and dynamic routing behavior under uncertainty mechanical transport system. It is proposed to modify Dijkstra's algorithm for the case of a fuzzy temporal hypergraph. Concludes that the evolutionary development of this class of systems as they gain experience of their operation.

Mechanical transport system; fixed routing; dynamic routing; fuzzy temporal hypergraph; Dijkstra's algorithm.

Введение. Механические транспортные системы (МТС) представляют собой разновидность транспортных систем, перемещающих груз с помощью конвейеров. Конвейеры образуют сеть, в узлах которой находятся переключатели направления. Примером таких систем являются МТС доставки багажа в аэропортах. На эффективность работы МТС сильно влияет качество маршрутизации. Одним из перспективных путей оптимизации системы является использование интеллектуальных методов решения сложных задач. Как известно, [1] «сильным» методом решения является использование опыта. При наличии мощных средств программирования и настройки встроенных систем управления МТС [2] возникает возможность эволюционного развития МТС как системы, накапливающей и использующей знания.

1. Применение известных методов маршрутизации в МТС. Методы маршрутизации, применяемые в транспортных сетях, можно разделить на методы фиксированной и динамической маршрутизации. Фиксированная маршрутизация использует не изменяющиеся таблицы маршрутов. Динамическая маршрутизация изменяет таблицу маршрутов при изменении состояния среды транспортировки.

Основным достоинством фиксированной маршрутизации является простота реализации. При этом она обладает следующими недостатками:

- ◆ неполные и неточные данные о параметрах транспортной сети заставляют прибегать к упрощениям и обобщениям при построении маршрутных таблиц. Оценки стоимости путей транспортировки могут не соответствовать реальности;
- ◆ предположение о стабильности транспортного потока и параметров сети не всегда истинно. Детерминированный выбор направлений в узлах может не соответствовать текущему состоянию сети.

Областью применения фиксированной маршрутизации являются относительно несложные МТС, функционирующие в стабильной внешней среде.

Реализация динамической маршрутизации использует процедуры обновления таблиц в процессе функционирования. Выбор наилучшего маршрута в МТС может строиться на известном алгоритме Беллмана-Форда [2]. Каждый контроллер МТС строит таблицу обобщенных расстояний для всех узлов сети, обмениваясь маршрутными таблицами с соседними узлами. Применение подобного способа маршрутизации наталкивается на следующие проблемы:

- ◆ метрика расстояния между узлами определяется субъективно. Расстояние в обобщенном смысле отражает время, стоимость и надежность транспортировки. Поэтому понятие расстояния различно даже внутри сети для разных ее ребер. Как следствие, операции простого арифметического суммирования и сравнения расстояний неприменимы;
- ◆ время, стоимость и надежность транспортировки изменяются во времени непредсказуемо. Получить точные аналитические соотношения для их определения не удастся;
- ◆ управление маршрутизацией в реальном времени не всегда возможно. Как известно, алгоритм Беллмана-Форда гарантирует формирование маршрутных таблиц за конечное число операций обмена таблицами между соседними узлами сети. Однако из-за ограниченной скорости передачи содержимое маршрутных таблиц может не соответствовать реальному состоянию сети.

2. Постановка задачи. Задача маршрутизации рассматривается в следующей постановке. Имеется транспортная сеть, перемещающая партии груза между узлами. В партии N единиц груза и каждая единица перемещается из узла-отправителя в узел-получатель за время $t_i (i = \overline{1, N})$, проходя при этом маршрут длиной $l_i (i = \overline{1, N})$. В процессе прохождения маршрута могут происходить сбои и отказы f_i из множества допустимых дефектов F . Под дефектами понимается возникновение пробок в потоке, ошибки в доставке, повреждение единицы груза, и т.д. Маршрутизация заключается в решении задачи

$$\begin{cases} \sum_i l_i \rightarrow \min, \\ \max(t_i) < t^*, \\ f_i \subseteq F, \end{cases} \quad (1)$$

где t^* – ограничение на время транспортировки единицы груза. Учитывая отмеченные выше трудности, будем считать, что задача решается на основе знаний экспертов о поведении транспортных потоков. Эти знания выражаются в форме указания на схеме МТС подсетей и их свойств – времени транспортировки (T_k), длины маршрута (L_k) и возможных дефектов (F_k). Указывается также интервал времени $[t_a, t_b]$, в течение которого свойства сохраняют свое значение постоянным. Все значения свойств и интервала времени являются нечеткими. Таким образом, предполагается однородность и стабильность процессов транспортировки в подсетях. На схеме МТС отображаются пересекающиеся зоны, которые ограничивают подсети. Представим структуру МТС темпоральным гиперграфом $G = (V, E_t)$ с множеством вершин V и множеством дуг E_t , веса которых изменяются во времени:

$$E_t = (w_i, \tilde{t}_i).$$

Здесь w_i – вес дуги, \tilde{t}_i – интервал времени, в течение которого дуга сохраняет вес постоянным.

В настоящей работе исследуется реализация фиксированной и динамической маршрутизации при наличии опыта, отображенного гиперграфом описанного вида. Целью исследования является выявление факторов, влияющих на качество решения задачи (1).

3. Фиксированная маршрутизация. Организация маршрутизации как фиксированной основана на предположении о стабильности поведения транспортных потоков. Это означает:

- ◆ стабильность расписания появления партий груза на узлах-источниках;
- ◆ устойчивость потоков дефектов в подсетях.

Свойствами каждой дуги гиперграфа являются:

- 1) нечеткое значение времени транспортировки единицы груза;
- 2) нечеткое значение длины пути. Его описание аналогично рассмотренному выше;
- 3) подмножество множество дефектов.

Маршрутные таблицы для каждого узла МТС формируются в результате нахождения кратчайшего маршрута между заданной парой вершин темпорального гиперграфа. Задача нахождения кратчайшего маршрута в случае темпоральной зависимости весов гиперграфа формулируется следующим образом: задан гиперграф $G = (V, E_t)$, зависимость $E_t = (w_i, \tilde{t}_i)$, время начала движения по маршруту t_0 и пара вершин (v_b, v_e) , не лежащих на одной дуге гиперграфа. Необходимо найти маршрут из v_b в v_e минимального веса.

Для решения задачи могут использоваться идеи известных алгоритмов поиска кратчайших путей в графах [5]. Реализация любой идеи будет отличаться тем, что должна включать в себя анализ достижимости вершин на заданном временном интервале. Считается, что вершина v_i достижима из вершины v_j на интервале времени $[t_a, t_b]$, если существует путь из v_j в v_i , содержащий только дуги с ненулевым весом ($w_i > 0$).

В качестве примера рассмотрим модификацию алгоритма Дейкстры.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1) установить номер итерации $k = 1$, в качестве вспомогательного гиперграфа использовать $g^{(0)} = \{v_b\}$, установить текущую точку анализа на оси времени $t^{(0)} = t_0$;
- 2) найти все вершины в гиперграфе G , достижимые из вершин $g^{(k-1)}$ на момент времени $t^{(k)} = \min_{v_i \in g^{(k-1)}} (t^{(k-1)} + \tilde{t}_i)$. Обозначим через g' подграф, включающий в себя все отобранные вершины и дуги гиперграфа G , связывающие его с гиперграфом $g^{(k-1)}$;
- 3) построить вспомогательный гиперграф $g^{(k)} = g^{(k-1)} \cup g'$;
- 4) пометить вершины $g^{(k)}$ соответственно алгоритму Дейкстры. Если среди окончательно помеченных вершин окажется v_b , перейти к п. 6, иначе к п. 5;
- 5) установить $k = k + 1$ и перейти к п. 2;
- 6) end.

Для случая нечеткого задания параметров темпорального гиперграфа алгоритм использует операции суммирования и сравнения нечетких интервалов времени и весов дуг, заданных нечеткими числами [6-9].

4. Динамическая маршрутизация. Суть динамической маршрутизации состоит в наличии механизма адаптации к текущей ситуации в МТС. Ситуация изменяется из-за сбоев и отказов оборудования, сбоев в графике поступления потоков груза, повреждении груза. Выбор маршрута транспортировки более сложен, поскольку использует логику оценки ситуации.

Эксперт, наблюдающий сеть, вряд ли способен сформулировать правила маршрутизации в узлах. Для него более естественным является констатация того, что определенные области МТС работают либо нормально, либо чрезмерно загружены, либо недогружены, и т.д. Поэтому рассмотрим модель маршрутизации на основе знаний эксперта о состоянии подсетей.

Будем считать, что каждая подсеть МТС может находиться в одном из множества допустимых состояний. Минимально возможны два состояния. Они ассоциируются с работоспособностью и неработоспособностью подсети. Большее число состояний целесообразно вводить для более тонкого управления грузопотоками.

Введем лингвистическую переменную S , значения которой соответствуют состояниям подсети, а областью определения является числовая ось длины пути по конвейеру. Тогда каждому лингвистическому значению может быть сопоставлено нечеткое значение длины пути.

Представим МТС нечетким гиперграфом $G = (V, E')$, где $E'_i = (w_i(s_j)), s_j \in S$. Вес дуги $w_i(s_j)$ является функцией состояния подсети, которое представляется нечеткой лингвистической переменной. Задача маршрутизации состоит в том, чтобы найти кратчайший путь между заданной парой вершин (v_b, v_e) , не лежащих на одной дуге гиперграфа.

Решение задачи может быть получено с помощью алгоритма Дейкстры, модифицированного на случай нечетких весов дуг гиперграфа. Модификация не затрагивает логику пометки и обхода вершин, а относится к выполнению двух важных операций: суммирования весов дуг и их сравнения.

Шаг 1. Перед началом алгоритма все вершины и дуги не окрашены (используется понятие окрашивание вершин, которое подразумевает, что все вершины обработаны и помечены одним цветом).

Шаг 2. Проверка инцидента ли вершина $v_b \in \bar{e}_i$ с каким-либо ребром гиперграфа. Если вершина является изолированной, то закончить алгоритм, искомым маршрут невозможно построить. Если вершина инцидента с ребром, то переход к Шагу 3.

Шаг 3. Каждой вершине в ходе выполнения алгоритма присваивается число $\tilde{d}(v_i)$, равное кратчайшему пути из v_b в v_i , включающие только окрашенные вершины (в данном случае рассматриваются вершины для окрашивания инцидентные более чем с одним ребром, за исключением начальной v_b и конечной вершины v_e).

Положить $\tilde{d}(v_b) = (0)$, и $\tilde{d}(v_i) = (\infty)$ для всех v_i , отличных от v_b . Пометить вершину v_b и положить $y = v_b$ (y – последняя из окрашенных вершин).

Шаг 4. Перед началом построения маршрута необходимо определить уровень загруженности подсети, т.е. $s_j \in S_i$, соответственно, определение веса ребра $w_i(s_j)$, включающее в себя такие параметры, как: расстояние, время и затраты.

Шаг 5. Поиск множества смежных ребер с ребром \bar{e}_i , т.е. $\bar{e}_i \cap \bar{e}_j \neq \emptyset$.

Шаг 6. Для каждой неокрашенной вершины v_i , инцидентной не только начальному ребру, пересчитать величину $\tilde{d}(v_i)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{d}(v_i) = \min\{\tilde{d}(v_i), \tilde{d}(v_i) + w_i(y, v_i)\} \\ \theta = y \end{array} \right.$$

где $w_i(y, v_i)$ – нечеткая длина ребра, θ – значение вершины (вершин), из которой был построен кратчайший маршрут в вершину v_i .

Если $\tilde{d}(v_i) = (\infty)$ для всех неокрашенных вершин v_i , закончить процедуру алгоритма и считать, что в исходном графе отсутствуют пути из v_b в неокрашенные вершины. В противном случае окрасить ту из вершин v_i , для которой величина

на $\tilde{d}(v_i)$ является наименьшей. Кроме того, окрасить дугу, ведущую в выбранную на данном шаге вершину $\tilde{d}(v_i)$ (если рассмотрены все инцидентные вершины ребра). Положить $y = v_i$.

Шаг 7. Если $y = v_b$, закончить процедуру: кратчайший путь L из вершины v_b в v_b найден. В противном случае перейти к шагу 4.

Любому заданному лингвистическому значению S сопоставляется нечеткое множество $\{\mu_1/x_1, \mu_2/x_2, \dots, \mu_Q/x_Q\}$, где Q – количество термов S ; X – базовое множество. Сложение множеств предлагается выполнять по известному принципу: суммой нечетких множеств A и B является множество из элементов

$$\min(\mu_a, \mu_b) / a + b,$$

где $\mu_a/a \in A$ и $\mu_b/b \in B$ – любая пара элементов двух исходных нечетких множеств. Таким образом, по мере увеличения числа дуг на пути мощность множества растет.

Сравнение длины путей предлагается выполнять через сравнение «центров тяжести» нечетких множеств [7]. Если A и B являются нечеткими путями, то

$$A < B \Rightarrow \left(\sum_{\mu_i/a_i \in A} a_i \mu_i / \sum \mu_i \right) < \left(\sum_{\mu_i/b_i \in B} b_i \mu_i / \sum \mu_i \right).$$

Отметим особенность реализации маршрутных таблиц, которые строятся из полученного решения на гиперграфе. Задача динамической маршрутизации допускает множество решений: если МТС имеет M подсистем с Q состояниями, то общее число состояний МТС составит Q^M . Каждому состоянию соответствует гиперграф G с M дугами, в котором определяется маршрут минимального веса из заданной вершины v_b в вершину v_e . Соответственно, число маршрутов минимального веса также составит Q^M . Хранение всех решений в памяти контроллеров достаточно проблематично из-за значительного объема таблиц. Однако, таблица маршрутизации избыточна, поскольку на практике реализуется только небольшая часть состояний МТС. Эту часть может указать только эксперт, наблюдающий систему. Следовательно, экспертные знания позволят реализовать решения оптимизационной задачи (1).

Анализируя динамическую маршрутизацию в МТС, следует сделать следующие выводы.

Динамическая маршрутизация явным образом учитывает дефекты в процессе работы МТС. Ориентация на знания экспертов в этом случае помогает снизить неопределенность поведения МТС при появлении дефектов. Чтобы получить знания более высокого качества, необходимо использовать нечеткие лингвистические переменные для описания состояний МТС.

Серьезной проблемой реализации является значительный объем памяти контроллеров для хранения таблиц маршрутизации. Решение данной проблемы также может быть найдено из опыта наблюдения МТС экспертами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Luger G.F.* Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. Addison Wesley (2004).
2. *Black G., Vyatkin V.* Intelligent Distributed execution and cyber-physical design of Baggage Handling automation with IEC 61499 // Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics. – 2011. – P. 573-578.
3. *Cormen T., Leiserson C. Rivest R., Stein C.* Introduction to Algorithms. – 3rd. – MIT Press, 2009.

4. *Розенберг И.Н., Беляков С.Л.* Программные интеллектуальные оболочки геоинформационных систем. – М.: Научный мир, 2010.
5. *Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Боженик А.В.* Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 121-127.
6. *Zimmerman H.-J.* Fuzzy Set Theory and Its Applications (2nd edition). – Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 1991. – 435 p.
7. *Belyakov S., Savelyeva M.* The construction of fuzzy time-dependent route in geographic information system // Proc. “East West Fuzzy Colloquium 2013 20thZittau Fuzzy Colloquium”, 2013. – P. 63-69.
8. *С.Л.Беляков, Белякова М.Л., Розенберг И.Н., Савельева М.Н.* Прецедентный анализ маршрутов на электронных картах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (132). – С. 82-89.
9. *Беляков С.Л., Савельева М.Н.* Кластеризация при логистическом рутинге // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 242-247.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

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.: 88634371695; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Белякова Марина Леонтьевна – e-mail: asni@fep.tti.sfedu.ru; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; доцент.

Боженик Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Савельева Марина Николаевна – e-mail: marina.n.savelyeva@gmail.com; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; ассистент.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: beliacov@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371695; the department of applied information science; dr.of eng. sc.; professor.

Belyakova Marina Leontyevna – e-mail: asni@fep.tti.sfedu.ru; the department of automated systems for research; cand. of eng. sc.; associate professor.

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

Savelyeva Marina Nikolaevna – e-mail: marina.n.savelyeva@gmail.com; the department of automated systems for research; assistant.

УДК 62-522.7

Е.В. Стегачев, М.Г. Кристаль, Г.В. Ольховик

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЗАХВАТНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ПРЕДМЕТОВ С МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ ЗАХВАТЫВАНИЯ

Рассмотрены пневматические хватные устройства (ПЗУ) с созданием вихревого потока тангенциальной подачи рабочей среды в цилиндрическую вихревую камеру, с последующим увеличением тангенциальной составляющей скорости струи вращением стенок или питающих сопел камеры, что увеличивает степень разрежения в приосевой зоне вихревой камеры и повышает грузоподъемность ПЗУ. Предложены конструкции с созданием разнонаправленных струй воздуха, обеспечивающих автоматическое предварительное базирование