

Отделение общественных наук РАН
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Центральный экономико-математический институт РАН
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный университет»
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
Институт системного анализа
Лаборатория исследования социальных отношений и многообразия общества
(ЛИСОМО РЭШ)
Негосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Российская экономическая школа»
Университет Дмитрия Пожарского

Системное моделирование социально-экономических процессов

**Юбилейная Международная научная
школа-семинар имени
академика С.С. Шаталина**

**(Основана в 1978 г.
С.С. Шаталиным и Н.Я. Краснером)**

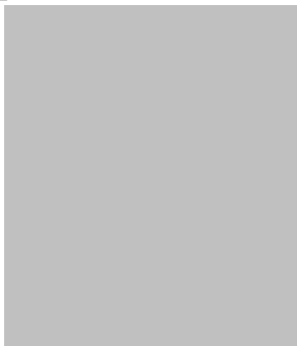
XL

заседание



ТРУДЫ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА

**При поддержке РФФИ
(Проект – 17-06-20537-Г)**



**1–7 октября 2017 г.,
г. Воронеж**

УДК 330:01.12; 330.4; 330.34; 330.35
ББК 65.050я7
С40

Редакционная коллегия:

д.э.н. *В.Г. Гребенников* (ЦЭМИ РАН),
д.э.н. *И.Н. Щепина* (ВГУ)

Системное моделирование социально-экономических процессов: труды 40-ой Юбилейной международной научной школы-семинара, г. Воронеж, 1-7 октября 2017 г. / под ред. д-ра экон. наук В.Г. Гребенникова, д-ра экон. наук И.Н. Щепиной. – Воронеж : Изд-во «Истоки», 2017. – 558 с.

System modeling of social-economic processes: The Material 40-th Anniversary international scientific school-seminar / Ed. By V.G. Grebennikov, I.N. Shchepina. – Voronezh, «Istoki», 2017. – 558 с.

ISBN 978-5-4473-0180-4

Материалы опубликованы с технической корректировкой, редакторы постарались в максимальной степени сохранить индивидуальный стиль авторов. *Позиция авторов не обязательно совпадает с позицией редакционной коллегии.*

Предназначено для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов, занимающихся исследованиями в области экономики.

УДК 330:01.12; 330.4; 330.34; 330.35
ББК 65.050я7

Официальный сайт школы-семинара: www.smsep.ru (www.смсэп.рф)

*Мероприятие проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 17-06-20537-г*

ISBN 978-5-4473-0180-4

- © ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 2017
- © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центральный экономико-математический институт РАН, 2017
- © ФИЦ ИУ РАН Институт системного анализа, 2017
- © Лаборатория исследования социальных отношений и многообразия общества (ЛИСОМО РЭШ), 2017
- © НОУ ВО «Российская экономическая школа», 2017
- © Университет Дмитрия Пожарского, 2017
- © Издательство «Истоки», редакционно-издательское оформление, 2017

Бурилина М.А., Трофимова Н.А. Использование сетевого подхода к анализу транспортных проблем	506
Винокуров С.С., Телехов И.И. Моделирование внимания в играх	510
Волкова М.И. Формирование системы индивидуальных потребностей в современном обществе (пример России и стран Европы)	514
Давыдовский А.Г. Математическое моделирование развития технопарка на основе информационных потоков	518
Емельянова И.А. Некоторые подходы к моделированию спроса на культурные мероприятия	522
Леонидов А.В., Серебрянникова Е.Е. Макроэкономическая динамика на сети затраты-выпуск	526
Максимова Е.А. Алгоритм «имитация отжига» для построения эффективного расписания движения поездов	530
Светлов Н.М. Эндогенная классификация периодов в модели развития сухопутных транспортных сетей	534
Силаева В.А., Силаев А.М. Эконометрические модели для высоких и низких оценок единых государственных экзаменов	538
Соколовский Ю.М., Филатов А.Ю. Монополистическая конкуренция с неоднородным трудом: модель, учитывающая рост производительности эффективных фирм	542
Оргкомитет	546
Сведения об авторах	549

АЛГОРИТМ «ИМИТАЦИЯ ОТЖИГА» ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Улучшение качества работы транспортной инфраструктуры (значительную часть которой составляют железнодорожные перевозки) важно для экономики любой страны. Основываясь на стандартной модели задачи построения расписания, которая предполагает оптимизацию обслуживания для фиксированного спроса, исследователи применяли множество различных алгоритмов для решения этой задачи, которые показывали неплохие результаты как для искусственно сформированных входных данных, так и для данных о реальной железнодорожной сети (см., например, [1-3]). Но поскольку в настоящее время транспортная инфраструктура достаточно развитая в странах Европы и Азии, существует много альтернативных видов транспорта кроме поездов, таких как автобусы, автомобили (как личный автотранспорт, так и такси), и у потенциальных клиентов железнодорожной сети появляется возможность выбора транспорта. А, следовательно, если расписание железнодорожной сети будет не самым подходящим для пассажиров по сравнению с другим видом транспорта, спрос именно на железнодорожные перевозки будет падать. Поэтому возникает проблема построения расписания регулярных пассажирских перевозок в условиях непостоянного спроса.

Целью данной работы является разработка алгоритма, который может обеспечить планирование расписания пассажирских железнодорожных перевозок в условиях ограниченной (различными техническими, технологическими, временными и др. факторами) инфраструктуры.

Пусть изначально известно количество пассажиров, которому нужно переместиться от железнодорожной станции «о» до станции «d» - Λ_{od} . Оценить количество пассажиров, которые воспользуются услугами железнодорожного транспорта при переезде между двумя станциями (o, d) $\lambda_{od}(t_{od})$ (см. [4]) - можно как произведение Λ_{od} на вероятность, с которой человек выберет поезд в качестве средства передвижения:

$$\lambda_{od}(t_{od}) = \Lambda_{od} \frac{e^{V_{od}^{(t)}(t_{od})}}{e^{V_{od}^{(b)}(t_{od})} + e^{V_{od}^{(c)}(t_{od})} + e^{V_{od}^{(t)}(t_{od})}},$$

где $V_{od}^{(j)}$ - линейная комбинация параметров, уникальных для каждой пары станций (o, d) , (с соответствующими весовыми коэффициентами), которые влияют на выбор пассажиров (время в пути - t_{od} , стоимость поездки, уровень комфорта и т.д.) для различных видов транспорта (для автобуса (b) , автомобиля (c) и поезда (t)). В данном случае, все атрибуты в $V_{od}^{(b)}$ и $V_{od}^{(c)}$, и некоторые в $V_{od}^{(t)}$ (все, кроме времени в пути t_{od}) известны заранее и получены с помощью прямого из-

мерения на реальных железнодорожных системах. Коэффициенты в данных линейных комбинациях выражают чувствительность выбора пассажиров к изменению различных факторов.

Для решения задач комбинаторной оптимизации существует большое количество различных алгоритмов (см. [5,6]). В данной статье рассматривается алгоритм «имитация отжига» как один из возможных для решения данной задачи. За основу работы алгоритма берется его аналогия с обычным процессом кристаллизации, который применяется для повышения однородности металла, повышающее его качество.

Цель работы алгоритма – максимизация удовлетворенного спроса в условиях данной инфраструктуры, путем построения оптимального расписания регулярных пассажирских перевозок. Для работы данного алгоритма сначала необходимо составить начальное состояние системы (т.е. одно возможное расписание движения). Для анализа работоспособности и эффективности алгоритма будет реализовано несколько способов формирования первого решения:

- «Случайное» расписание – из всего начального спроса случайным равновероятным образом выбирается пара станций, спрос между которыми будем пытаться удовлетворить, отправляя поезда между ними в самое удобное возможное время.
- Жадный алгоритм – сначала отправляем поезда, которые удовлетворяют наибольшее количество спроса так, чтобы время ожидания пассажиров было минимальное.
- Смешанный алгоритм – пара станций, спрос между которыми алгоритм будет пытаться удовлетворить наилучшим образом, выбирается «случайным» образом, но с вероятностью, прямо пропорциональной объему спроса между ними

Далее считаем значение целевой функции по построенному начальному решению – это и будет начальной «энергией» нашей системы. Затем происходит процесс «охлаждения» системы – путем некоторых изменений в уже построенном решении мы получаем новое из его окрестности, которое мы либо применяем как актуальное и начинаем рассматривать его окрестности, либо не принимаем и остаемся в окрестности текущего – данный выбор зависит от значения целевой функции в новом решении и текущей «температуры». При этом в качестве «температуры» задаем какой-то параметр: его начальное и конечное значения и закон изменения; и, соответственно, процесс «охлаждения» как раз и будет происходить, пока данный параметр не станет меньше указанного конечного значения.

При анализе условий данной задачи, выявляются следующие окрестности, решения из которых могут быть эффективнее первоначально построенного:

- удаление одного из поездов по одной из линий из расписания;
- добавление поезда на какую-нибудь линию в расписание;
- сдвиг поезда в расписании (увеличение или уменьшение времени его остановки на станциях).

В предлагаемой реализации данного алгоритма выбор той окрестности, из которой на данном шаге будут рассматриваться решения, происходит случайным образом с вероятностями, которые можно указать как фиксированные значения в начале работы алгоритма, так и как переменные, зависящие от «температуры». Данное уточнение необходимо для оптимизации времени работы алгоритма для разных наборов данных и различных инфраструктур.

Следующим шагом, после выбора вида рассматриваемой окрестности, программа будет строить множество возможных решений из нее. Выбор решения из данного множества реализован несколькими способами: равновероятный выбор; выбор с вероятностями, пропорциональными увеличению значения итоговой целевой функции; «жадный» выбор – всегда принимаем самый выгодный на данный момент вариант.

Выбрав какое-то определенное решение из окрестности актуального, необходимо определить: будет ли алгоритм принимать его как актуальное и рассматривать в дальнейшем уже окрестности этого решения или же не будет принимать и искать новое решение в рассматриваемой окрестности. В классической реализации алгоритма «имитация отжига» данный выбор зависит от текущей «температуры» у системы и значения целевой функции. Если рассматриваемое решение лучше (имеет большее значение целевой функции), то алгоритм будет автоматически его принимать как актуальное и идти к дальнейшим решениям уже относительно него, а если решение хуже, то переход может быть также осуществлен (это необходимо во избежание застревания в локальных экстремумах целевой функции) относительно

определенной вероятности: $e^{-\left(\frac{F(x_i)-F(x^*)}{T_i}\right)}$, где x^* - актуальное решение, окрестности которого рассматриваются на данном шаге, x_i – очередное рассматриваемое решение из окрестности x^* , $F(x)$ – значение целевой функции в решении x , T_i – значение «температуры» в данный момент времени.

Для тестирования алгоритма были использованы набор реальных данных железнодорожной сети северо-западной Италии и набор сгенерированных случайным образом данных, которые удовлетворяют всем исходным ограничениям. Входные данные представляют собой наборы файлов с описанием железнодорожных линий, значения временных окон (минимально и максимально возможных между поездами, переход с одной линии на другую, ожидание поезда и т.д.), спрос между всеми парами станций, коэффициенты для подсчета вероятности и значения параметров для альтернативных видов транспорта. В среднем, каждая сеть состоит из 11 линий и 50 станций.

В процессе проведения исследования было проанализировано несколько подходов к обработке данных при работе алгоритма. Результаты показали, что наиболее эффективное решение сформируется при использовании «жадного» алгоритма для построения первого решения и метода, когда вероятность выбора окрестности зависит от текущей «температуры». Был создан программный продукт, который, используя наилучший из про-

анализированных подходов, строит расписание пассажирских перевозок для описанных наборов исходных данных. Результаты работы алгоритма на некоторых исходных данных в сравнении с уже найденными ранее решениями представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты работы программы на описанных тестовых данных

		Лучшее из ранее найденных решений	Полученные результаты	Общий спрос	Количество итераций
Реальные данные	Prova5	≈38 000	46 326	103 216	100
	Prova7	≈44 000	53 961	103 216	100
	Prova11	≈50 000	58 043	103 216	100
	Mortara	≈56 000	61 162	103 216	100
Сгенерированные данные	Rete 04_02_05	≈28 000	35 719	53 819	100
	Rete 06_06_10	≈200 000	239 614	389 162	100
	Rete 08_06_20	≈400 000	497 902	561 864	100
	Rete 10_10_50	≈500 000	605 352	1 028 927	100

Данный алгоритм показывает высокие результаты, находит решения со значением итогового результата выше, чем у уже найденных решений, строит расписание, согласно которому более 50% начального спроса выберут именно железнодорожные перевозки в качестве средства передвижения.

В дальнейшем планируется оптимизировать работу алгоритма, комбинируя алгоритм «имитации отжига» с другими возможными подходами нахождения глобального максимума функции с учетом ограничений, и для более легкой адаптации алгоритма к изменениям условий и введением новых ограничений, которые уже внедряются в данную задачу из-за постоянного развития рынка услуг в сфере железнодорожных перевозок.

Список использованной литературы:

1. Schrijver, A., Steenbeek, A. «Spoorwegdienstregelingontwikkeling» (Timetable Construction) Technical Report, CWI Center for Mathematics and Computer Science, Amsterdam (in Dutch) 1993 г.
2. Odijk, M.A. «A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables» Transportation Research Part B 30 (6) 1996г., 455–464 стр.
3. Nachtigall, K. «A Branch and Cut Approach for Periodic Network Programming» Technical Report 29, Hildesheimer Informatik-Berichte 1994 г.
4. Cordone R., Redaelli F. «Optimizing the demand captured by a railway system with a regular timetable» Transportation Research Part B, vol. 45, no. 2 2011г., 430–446стр.
5. Nachtigall, K., Voget, S. «Minimizing waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks» European Journal of Operational Research 103 (3) 1997г., 610–627 стр.
6. Nachtigall, K. «Periodic network optimization with different arc frequencies» Discrete Applied Mathematics 69 (1–2) 1996, 1–17стр.