



ОТДЕЛЕНИЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК РАН  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ –  
ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"  
ЛАБОРАТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ  
И МНОГООБРАЗИЯ ОБЩЕСТВА (ЛИСОМО)  
НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ШКОЛА»

# Системное моделирование социально-экономических процессов

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

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

**XXXIX**

заседание

# ТРУДЫ

При поддержке РФФИ  
(Проект – 16-06-20677-г)

*30 сентября – 6 октября 2016 г.,  
г. Санкт-Петербург*

ВОРОНЕЖ<sup>\*</sup>  
2016

УДК 330:01.12; 330.4; 330.34; 330.35

ББК 65.050я7

С40

Редакционная коллегия:

проф. *В.Г. Гребенников* (ЦЭМИ РАН);

доц. *И.Н. Щепина* (ВГУ)

**Системное моделирование социально-экономических процессов : труды 39-ой международной научной школы-семинара, г. Санкт-Петербург, 30 сентября – 6 октября 2016 г. / под ред. д-ра экон. наук В.Г. Гребенникова, д-ра экон. наук И.Н. Щепиной. – Воронеж : Воронежский государственный педагогический университет, 2016. – 554 с.**

**System modeling of social-economic processes: The The Material 39-th international scientific school-seminar / Ed. by V.G. Grebennikov, I.N. Shchepina. – Voronezh: Voronezh State Pedagogical University, 2016. – 554 p.**

ISBN 978-5-00044-464-1

В сборнике представлены аннотации к докладам и сообщениям 39-ой Международной научной школы-семинара имени академика С.С. Шаталина «Системное моделирование социально-экономических процессов».

Официальный сайт школы-семинара: [www.smsep.ru](http://www.smsep.ru) ([www.смсэп.рф](http://www.смсэп.рф))

УДК 330:01.12; 330.4; 330.34; 330.35

ББК 65.050я7

*Мероприятие проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 16-06-20667-г*

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 2016

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Центральный экономико-математический институт РАН, 2016

© Северо-западный институт управления – филиал

ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Прези-

денте Российской Федерации», 2016

© Лаборатория исследования социальных отношений

и многообразия общества (ЛИСОМО), 2016

© НОУ ВПО «Российская экономическая школа», 2016

© Воронежский государственный педагогический университет,

ISBN 978-5-00044-464-1 редакционно-издательское оформление, 2016



<b>Филатов А.Ю.</b>	485
Неоднородность поведения фирм в олигополии: стратегические фирмы и ценополучатели	
<b>Хвостова И.Е.</b>	488
Моделирование правила валютной политики в динамической стохастической модели общего равновесия для российской экономики	
<i>Сообщения</i>	
<b>Агранович Ю.Я., Калягин И.О.</b>	492
Задача о совпадении многоугольных чисел и некоторые арифметические свойства полиномов Чебышёва	
<b>Азарнова Т.В., Половинкин И.П., Рабеев С.А., Щепина И.Н.</b>	495
Обсуждение принципа Гюйгенса в рамках макроэкономической модели Т. Пу	
<b>Аснина А.Я., Аснина Н.Г., Сырых О.С.</b>	499
Что делать с мультипроектом с директивными сроками, если они не могут быть выполнены?	
<b>Бушанский С.П.</b>	503
Моделирование технологических изменений в строительстве инфраструктурных объектов	
<b>Винокуров С.С., Телехов И.И.</b>	507
Логистическое равновесие дискретного отклика в играх с рационально невнимательными игроками	
<b>Воищева О.С., Щекунских С.С.</b>	511
Риск-предикторный факторный анализ предпринимательской деятельности	
<b>Лапшина С.Н.</b>	515
Оценка эффективности функционирования научно-промышленных кластеров	
<b>Ларин А.В., Новак А.Е., Хвостова И.Е.</b>	516
Уравнение Эйлера для потребления в условиях ограничения ликвидности	
<b>Максимова Е.А.</b>	519
Алгоритм «имитация отжига» для построения эффективного расписания движения поездов	

## 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, но, к сожалению, деятельность железнодорожных компаний, осуществляющих грузовые перевозки, ограничена большим количеством различных факторов (технических, технологических, временных и др.). В связи с этим необходимо наличие эффективных автоматизированных инструментов для улучшения качества планирования осуществления железнодорожных грузоперевозок. Особенно это актуально в Европе, где грузоперевозки осуществляются множеством частных компаний, работающих с одной инфраструктурой.

Целью данной работы является разработка алгоритма, который может обеспечить планирование расписания на загруженных большим трафиком междугородних железнодорожных коридорах. Компании-перевозчики подают запросы на использование путей данной железнодорожной линии для поездов. После сборки воедино всех таких запросов запускается алгоритм оптимизации, чтобы организовать движение поездов максимально выгодным способом и, в конечном счете, ознакомить всех операторов с предложенным планом распределения треков и относительных «плат за доступ» и «штрафных санкций».

Для решения задач комбинаторной оптимизации существует большое количество различных алгоритмов (см., например, [1-5]). В данной статье рассматривается алгоритм «имитация отжига» как один из возможных. За основу работы алгоритма берется его аналогия с обычным процессом кристаллизации, который применяется для повышения однородности металла, что повышает его качество.

Цель работы алгоритма – найти такое расписание движения поездов, в котором прибыль будет максимально возможной или станет наименьшей разница между идеальной прибылью от всех поездов и реальной прибылью при построенном решении.

На первом шаге составляем одно из всех возможных расписаний движений. Данное решение имеет какое-то значение целевой функции. Это как раз и является той «энергией», которая передается системе изначально. Затем осуществляем процесс «охлаждения» - путем различных изменений в уже построенном решении получаем новое решение, т.е. перейти в другое решение, находящееся в окрестности актуального решения. В данном алгоритме выделяются окрестности, образованные 4 типами возможных операций:



- удаление одного из включенных в расписание поездов;
- добавление отмененного поезда в расписание;
- сдвиг отправления с начальной точки маршрута поезда;
- сдвиг отправления на промежуточных станциях маршрута.

Программа сама выбирает, в какую окрестность ей далее пойти. В этот момент происходит случайный выбор из данных четырех изменений. Отметим, что в начале программы можно задать вероятность выбора каждого изменения, и тогда выбор будет реализован на основе этих вероятностей. Это необходимо для оптимизации работы алгоритма, например, на исходных данных, в которых нет временных рамок на отправление и прибытия поезда, а заданы конкретные значения для движения. В таком случае, естественно, нет смысла искать окрестности путем сдвига времени отправления, так как их просто не существует. Поэтому заранее задав вероятность выбора данным изменениям, избавляем программу от рассмотрения заранее неподходящих окрестностей и оптимизируем ее работу.

Когда программа выбрала, какое изменение ей произвести, она строит множество из возможных изменений такого типа, подсчитывая и запоминая прибыль при каждом таком изменении. Далее необходимо выбрать, какое конкретное изменение из этой таблицы необходимо взять. Наиболее вероятно, что изменение с самой большой прибылью приведет к лучшему решению (не всегда, но с высокой вероятностью). Поэтому и программа будет выбирать изменение из данной таблички не равновероятно, а с помощью собственной функции «randomWithProbabilities». Эта функция подсчитывает для каждого изменения свою вероятность выбора исходя из прибыли и выберет с учетом этих вероятностей случайное изменение, которое программа и сгенерирует как очередное рассматриваемое решение.

Построив новое решение из окрестности актуального, программа должна решить: принимать ли это решение как актуальное и далее рассматривать окрестности уже этого решения или не принимать его и искать новое в окрестности старого актуального. Данный выбор зависит от значения целевой функции и «температуры», которой соответствует наше решение в данный момент. Очевидно, что если программа нашла лучшее по отношению к актуальному решению, то она его обязательно принимает, так как цель – найти наилучшее решение. А если очередное рассматриваемое решение не дает лучшее решение по отношению к актуальному, то тут есть несколько вариантов. Помним, что у функции могут быть локальные и глобальные экстремумы. Основная цель – найти глобальный экстремум, поэтому во избежание «застревания» в локальном экстремуме следует иногда переходить в состояние с «большой энергией» или в худшее решение по отношению к актуальному. В данном алгоритме определение вероятности перехода рассчитывается по формуле:  $e^{-\frac{F(x^*)-F(x_i)}{T_i}}$ , где  $x^*$  - актуальное ранее принятое решение,  $x_i$  – очередное рассматриваемое решение из



окрестности  $x^*$ ,  $F(x)$  – значение целевой функции в решении  $x$ ,  $T_i$  – температура в данный момент рассмотрения системы.

Осуществим более формальное описание работы алгоритма «имитация отжига» для построения оптимального расписания движения поездов.

Пусть  $X$  – множество всех решений (конечных возможных расписаний) задачи,  $x_i \in X$  – решение, полученное на  $i$ -ом шаге, Пусть  $t_i \in R$  – значение температуры на  $i$ -ом шаге.

Далее введем необходимы для реализации функции:

- $F: X \rightarrow R$  – целевая функция, которую минимизируем. Данная функция соотносит каждому решению число. Оно представляет собой разность между максимальной идеальной прибылью от всех поездов и реальной прибылью очередного построенного решения с учетом штрафных санкций.

- $T: N \rightarrow R$  – функция, показывающая изменение температуры на каждом шаге. Отметим, что, исходя из основных принципов работы алгоритма, функция температуры должна быть убывающей. Данная функция отвечает за окончание работы программы.

- $S: X \rightarrow X$  – функция нахождения нового решения из окрестности актуального.

Процесс работы функции  $S$  был неформально описан выше. Начальные значения температуры и формула ее изменения могут быть разные. В процессе проведения экспериментов программа тестировалась с разными начальными значениями с линейными и степенными функциями изменения температуры, чтобы грамотно сделать выводы по тому, в каком случае и для каких типов исходных данных лучше подходит та или иная функция.

В 2008 г. сотрудники «ZIB Zuse Institute Berlin» создали открытую пополняемую библиотеку исходных данных для проверки алгоритмов построения оптимального расписания движения поездов (<http://ttplib.zib.de/?page=home>) Создатели сайта ведут статистику решений для этих наборов данных. Отметим, что даже при большом количестве используемых алгоритмов и предложенных реализаций, существуют еще такие данные, для которых оптимальное решение еще не найдено. Обычно у этих наборов большое количество исходных данных (около 40 станций, 120 путей, 285 поездов и около 5000 ограничений). Каждый набор содержит 3 файла: инфраструктура, в которой хранится вся информация по станциям и трекам, их вместимости, проходимости; идеальные запросы для каждого поезда, включая идеальное расписания, временные окна, в которых это расписание может сдвигаться, и штрафные санкции за отклонение от идеального расписания; наилучшее найденное на данный момент решение, т.е. такое расписание движения поездов, которое принесет наибольшую прибыль.

В итоге данных исследований был создан программный продукт, который на основе алгоритма, описанного ранее, строит расписание для тестовых данных из общедоступной библиотеки. Созданная Программа находит решение для всех тестовых данных (даже для таких объемных, с

которыми другие программы исследователей не смогли заработать и выдать хоть какое-то решение). На рис.1 представлена статистика результатов работы Программы как раз на таких массивных исходных данных – показаны максимальная и минимальная прибыль построенных Программой расписаний за 50 прогонов, и максимальное значение прибыли (прибыль, если бы удалось реализовать все запросы по их идеальному расписанию, т.е. «убрав» все ограничения)

	Iterations	Min	Max	Ideal
hakafu_simple_37_120_6-req34_0285_0344_6	50	158624.03	158763.64	2453600.0
hakafu_simple_37_120_6-req35_0285_0000_6	50	253171.80	259753.5	2453600.0
hakafu_simple_37_120_6-req49_0285_0344_6	50	111464.98	120887.90	2453600.0
hakafu_simple_37_120_6-req50_0285_0000_6	50	253156.75	255154.13	2453600.0
hakafu_stations_37_120_6-req04_0285_0331_6	50	1782032.84	1880030.69	2453600.0
hakafu_stations_37_120_6-req34_0285_0344_6	50	158687.47	163858.33	2453600.0
hakafu_stations_37_120_6-req35_0285_0000_6	50	253161.53	257577.19	2453600.0
hakafu_stations_37_120_6-req49_0285_0344_6	50	111445.59	116368.83	2453600.0

Рис.1 Статистика работы программы на еще нерешенных ранее тестовых данных

По итогам сравнения полученных результатов с уже известными ранее найденными оптимальными решениями можно сделать вывод, что алгоритм «имитация отжига» один из наиболее удачных подходов для решения этой задачи, так как в большинстве экспериментов он нашел оптимальное (или очень близкое к нему) решение, потребляя сравнительно мало ресурсов.

В качестве дальнейшей работы над задачей планируется оптимизировать работу алгоритма для лучшей его работы, 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. X. Cai, C. J. Goh. «A fast heuristic for the train scheduling problem». Comput. Oper. Res, Oxford, UK, 1994
2. U. Brännlund, P. O. Lindberg, A. Nou, J.-E. Nilsson. «Railway Timetabling using Lagrangian Relaxation». Transportation Science, Oxford, UK, 1998
3. A. Caprara, M. Monacib, P. Totha, P. L. Guidac. «A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem». Discrete applied mathematics, Italy, 2005
4. F. Fischer, C. Helmberg, J. Janßen, B. Krostitz «Towards Solving Very Large Scale Train Timetabling Problems by Lagrangian Relaxation». 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, ATMOS, 2008
5. A. Caprara, M. Fischetti, P. Toth «Modeling and solving the train timetabling problem». Operations Research, Italy, 2002