



**CONTROL SCIENCES**

**Научно-технический  
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

**УЧРЕДИТЕЛЬ**

**Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН**

**Главный редактор**

**Д.А. Новиков**

**Заместители главного  
редактора**

**Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пащенко**

**Редактор**

**Т.А. Гладкова**

**Выпускающий редактор**

**Л.В. Петракова**

**Издатель**

**ООО «СенСиДат-Контрол»**

Адрес редакции  
117997, ГСП-7, Москва,  
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 272.  
Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru  
www.ipu.ru/period/pu

Оригинал-макет  
и электронная версия  
подготовлены  
ООО «ЭЛЕКТРОНИНФОРМ»

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в типографии ГКС

Подписано в печать  
23.10.2007 г.

Заказ № PB507

Журнал зарегистрирован  
в Министерстве  
Российской Федерации  
по делам печати,  
телерадиовещания  
и средств массовых  
коммуникаций

Свидетельство о регистрации  
ПИ №77-11963  
от 06 марта 2002 г.

Журнал входит в Перечень ведущих  
рецензируемых журналов и изданий,  
в которых должны быть опубликованы  
основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученой  
степени доктора и кандидата наук

Подписные индексы:  
**80508** и **81708** в каталоге Роспечати  
**38006** в объединенном каталоге  
«Пресса России»

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## 5.2007

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Обзоры

**Нижегородцев Р.М., Ярославская Д.И.** Управление «рынком лимонов»: институциональный анализ проблемы неблагоприятного отбора . . . . . 2

#### Анализ и синтез систем управления

**Баранов В.В., Матросов В.М.** Модели полезности и риска в задачах управления деградирующими системами . . . . . 15  
**Кочкаров А.А., Салпагаров М.Б., Эльканова Л.М.** Дискретная модель структурного разрушения сложных систем . . . . . 21  
**Девятисильный А.С., Кислов Д.Е.** Псевдоспектры и устойчивость линейных систем . . . . . 27  
**Гузаиров М.Б., Ильясов Б.Г., Герасимова И.Б.** Системный подход к анализу сложных систем и процессов на основе триад . . . . . 32

#### Управление в социально-экономических системах

**Кузнецов А.В., Мандель А.С., Токмакова А.Б.** Об одной модели управляемой системы массового обслуживания . . . . . 39  
**Столбов В.Ю., Гитман М.Б., Федосеев С.А.** Устойчивость структурной модели управления производственными системами . . . . . 44  
**Буянов Б.Б., Лубков Н.В., Поляк Г.Л.** Математическая модель длительного вооруженного конфликта . . . . . 48

#### Информационные технологии в управлении

**Баканова Н.Б., Вишневский В.М., Семенова О.В.** Модель управления процессом доставки корреспонденции в крупных организационных структурах . . . . . 52  
**Лебедев В.Н., Курако Е.А., Москальков В.Е.** и др. Метод разделенных запросов для управления удаленным доступом к данным в распределенных информационных системах . . . . . 56  
**Данилова С.А.** Повышение эффективности обработки аperiodических потоков задач в информационных системах . . . . . 61  
**Кулида Е.Л.** Метод реализации тренировочных упражнений в компьютерном тренажерном комплексе . . . . . 65  
**Муромцев Ю.Л., Тюрин И.В.** Информационно-инструментальная среда разработки алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления промышленными объектами . . . . . 69

#### Управление в медико-биологических системах

**Безруков Н.С., Еремин Е.Л., Перельман Ю.М.** Автоматизированная система диагностики заболеваний легких . . . . . 75

#### Краткие сообщения

**Жевнеров В.А.** Метод вложенных координат . . . . . 81  
**Котляров И.Д.** Математическая модель принятия решения о приобретении франшизы . . . . . 84

\* \* \*

Contents & abstracts . . . . . 88

# УПРАВЛЕНИЕ «РЫНКОМ ЛИМОНОВ»: ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ОТБОРА

Р.М. Нижегородцев<sup>(1)</sup>, Д.И. Ярославская<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва;

<sup>(2)</sup>Финансовая академия при Правительстве РФ, г. Москва

Рассмотрены ключевые проблемы, связанные с наличием неблагоприятного отбора на современных отраслевых рынках: причины возникновения такого отбора, его последствия, возможности и механизмы управления данной ситуацией, а также преодоления этого неблагоприятного отбора.

Современное состояние многих отраслевых рынков характеризуется неравновесием и нестабильностью. На различных рынках стихийное взаимодействие интересов индивидуальных агентов приводит к ситуации неблагоприятного отбора (adverse selection). Эта ситуация, первоначально описанная Дж. Акерлофом в рамках модели «рынка лимонов»<sup>1</sup>, сегодня возникает на рынках весьма различных типов, и вопрос о том, насколько она связана с асимметрией информации, требует дополнительного исследования.

Наша непосредственная задача заключается в том, чтобы выяснить, на какой почве сегодня растут «лимоны» (какие причины приводят к обратному отбору), насколько они пригодны к употреблению (какие типы отраслевых рынков способны противостоять этому отбору) и, собственно, почему эти лимоны (какова цена вопроса, связанного с компенсацией механизма обратного отбора).

<sup>1</sup> В классической модели Акерлофа «лимонами» названы подержанные автомобили низкого качества, купля-продажа которых обусловлена тем, что потенциальный потребитель плохо информирован об их качестве, в отличие от продавца. Позже это название распространилось на любое благо низкого качества, обращающееся на рынке наряду с высококачественными благами того же вида.

Аналитический аппарат, разработанный современной институциональной экономикой<sup>2</sup>, способен в известной степени пролить свет на эти непростые вопросы.

## 1. ОГРАНИЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА: ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Парадигма рационального выбора, принимаемая на вооружение «мэйнстримом» современной экономической науки, исходит из предположений, что каждый экономический агент:

- 1) имеет индивидуальную функцию полезности;
- 2) в каждый момент знает, какие наборы экономических благ и в какой именно степени способны ее увеличить;
- 3) в каждый момент свободен в выборе приобретения любых экономических благ, причем единственным ограничением этой свободы является ограниченность его ресурсов, характеризующая его

<sup>2</sup> В одном из разделов институциональной экономики — теории контрактов — проблема неблагоприятного отбора получила весьма глубокую и тщательную математическую разработку, хотя сама постановка проблемы с точки зрения теории контрактов выглядит значительно более узко, чем с позиций современной институциональной экономики в целом.



бюджетной линией (кривой производственных возможностей).

Каждая из трех упомянутых предпосылок в реальной жизни наталкивается на серьезные проблемы, которые не всегда просто преодолеть.

1. Тезис о существовании индивидуальной функции полезности требует решения вопроса об идентификации экономического агента. Иными словами, характеризуя, допустим, экономическое поведение предприятия на той или иной рыночной нише или внешнеэкономическую политику государства, необходимо задаться вопросом, вправе ли мы считать их «индивидуальными» агентами и приписывать им наличие собственной функции полезности. Здесь возникают непростые проблемы, связанные с наличием общих экономических интересов и идентификацией носителей этих интересов. Контрактная теория фирмы, например, утверждает, что экономические интересы фирмы нельзя отождествлять с интересами ее руководителей (менеджеров высшего звена), тем более — с интересами рядовых сотрудников, так же, как экономические интересы страны нельзя отождествлять с интересами тех, кто этой страной управляет, о чем, в частности, писали Джеймс Бьюкенен и другие теоретики вирджинской школы.

2. Тезис о том, что каждый экономический агент в каждый момент знает, как устроена его функция полезности, предполагает абсолютную осведомленность каждого агента о потребительских качествах всех благ, находящихся в его распоряжении, с учетом всех возможных альтернативных способов их использования. Однако даже это неправдоподобное предположение не отменяет логических затруднений, вытекающих из факта нестабильности функции полезности, ее изменений во времени.

В результате принятия этих предпосылок сама проблема оптимальности сделанного выбора лишается смысла, ибо любой выбор может быть объяснен тем, что у агента, который его осуществил, в тот момент была так устроена функция полезности. Таким образом, каждое принятое решение или действие получает логическое объяснение одним лишь тем фактом, что оно совершилось.

Прибавим к этому, что, согласно теории предельной полезности, основой для соизмерения ценности экономических благ служит их способность увеличивать индивидуальную функцию полезности, поэтому в результате принятия маржиналистских предпосылок мы получаем столько оснований для соизмерения ценности благ, сколько существует индивидуальных функций полезности. Тем самым легко объясняется множественность цен одного и того же блага на одном и том же рынке, а унификация уровня цен, напротив, нуждается

ся в дополнительном обосновании (монопольный отраслевой рынок и т. п.).

3. Ограниченность свободы выбора представляет собой одну из актуальных проблем, подрывающих логику теории рационального выбора.

3.1. Информация о состоянии частных рынков асимметрична, она распространяется не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, и ее получение увеличивает трансакционные издержки получателя, связанные с ее приемом, переработкой, хранением и использованием. Поэтому характер информационных потоков, существующих в экономической системе, искажает рациональность выбора действующих в ней агентов.

3.2. Экономический агент часто вынужден принимать решения в ситуации, когда он не имеет ясного представления о критериях рациональности собственного выбора. В таких случаях выбор определяется достаточно случайными обстоятельствами, и лишь дальнейший ход событий способен показать степень рациональности однажды сделанного выбора.

Хорошим примером такого рода является выбор расположения клавиш на клавиатуре пишущей машинки (и, соответственно, компьютера), который был, как выяснилось впоследствии, неоптимальным, но прочно закрепился в существующих международных стандартах, изменение которых было бы сопряжено с огромными трансакционными издержками. По первым буквам англоязычной клавиатуры данный эффект (выбор в условиях отсутствия критериев оптимальности) называется в институциональной экономике QWERTY-эффектом. Попутно заметим, что расположение клавиш на русскоязычном варианте клавиатуры вызывает намного меньше нареканий, чем на английском.

3.3. Агент способен оптимизировать свой выбор не в любой момент, а лишь в определенных точках своей траектории. Однажды совершив выбор (независимо от степени его рациональности), экономический агент на определенное время становится его заложником. Смена места работы или жительства, переход к использованию новых моделей бытовой техники или программного обеспечения и другие последствия оптимизации выбора предполагают наличие трансакционных издержек, связанных с адаптацией, обучением, привыканием к институциональной или технологической среде, в которой действует агент. Хороший пример данной проблемы — попытка переноса в другое место городской свалки отходов, которая требует огромного объема трансакционных издержек, направленных не только на физическое перемещение этой свалки, но и на «переобучение» всех агентов, ко-

торые так или иначе привыкли к ее прежнему местоположению.

Данная проблема давно и плодотворно обсуждается в рамках так называемого сценарного подхода к анализу и прогнозированию поведения динамических систем, а в современной институциональной теории получила название «path dependency» — зависимость от предшествующего пути развития.

С точки зрения теории рационального выбора, поведение агента (или любой динамической системы) напоминает положение путешественника в пустыне, где существует в принципе бесконечное множество направлений и изменить траекторию можно в любом месте пространства и в любой момент времени. На самом деле динамика реальных систем чаще напоминает движение автомобиля по шоссе: существует лишь ограниченное число возможных вариантов развития (именно эти варианты и отражаются *сценариями*), и изменить траекторию системы можно лишь на определенных ее участках и лишь в определенные моменты времени.

Применение сценарного подхода позволяет обнаружить периоды виртуальных бифуркаций, соответствующие участкам разветвления вероятных траекторий изучаемых динамических систем. В противоположность таким периодам выделяются зоны устойчивости — интервалы времени, в течение которых траектория «притягивается» к одному из ограниченного числа возможных вариантов, характеризующих поведение данной системы. Подобное чередование зон *аттракции* и зон *бифуркации* предопределяет неравномерность и вариативность динамики некоторых классов сложных систем.

Зависимость от предшествующего пути развития способна увековечить (или по меньшей мере надолго зафиксировать) однажды сделанный выбор независимо от степени его рациональности. Таким образом, ситуация «path dependency» может привести к возвращению лимонов только по той причине, что они первыми проросли на данном отраслевом рынке, как это в свое время случилось с клавиатурой QWERTY.

Заметим, что по мере развития событий само понятие оптимальности претерпевает изменения. Место, изначально выбранное для городской свалки в соответствии с единогласным пожеланием всех жителей города, по мере разрастания этого города и изменения его очертаний перестает быть оптимальным и требует пересмотра однажды принятого решения. Тем самым, понятие «лимона» носит, вообще говоря, исторический характер, оно не является абсолютным.

## 2. ПРОБЛЕМА НАСЫЩЕНИЯ РЫНКА И НЕБЛАГОПРИЯТНЫЙ ОТБОР

Заметим, что при выполнении предпосылок совершенной конкуренции неблагоприятный отбор на отраслевом рынке невозможен. Ситуация *adverse selection* означает, что существуют веские причины, по которым данный рынок непохож на совершенно конкурентные рынки.

В большинстве случаев причины этого несходства заключаются в самом внутреннем устройстве рынков. В других случаях их делает неконкурентными государство, без вмешательства которого данные рынки были бы похожи на рынки совершенной конкуренции. В качестве примера приведем рынок хлебопродуктов, на котором задача государства заключается в том, чтобы обеспечить насыщение рынка.

Стандартная задача увеличения объема отраслевого рынка возникает в случае, когда равновесный объем производства  $Q_{eq}$  оказывается (и признается правительством) недостаточным для удовлетворения общественной потребности, составляющей величину  $Q_0$ . Такая ситуация часто возникает при наличии значительного внешнего эффекта от функционирования отраслевого рынка и побуждает правительство принимать меры для стимулирования роста объемов производства.

При всем разнообразии этих мер общая логика их применения укладывается в два принципиально различных варианта: стимулирование предложения на данном отраслевом рынке (рис. 1) и стимулирование спроса (рис. 2) [1].

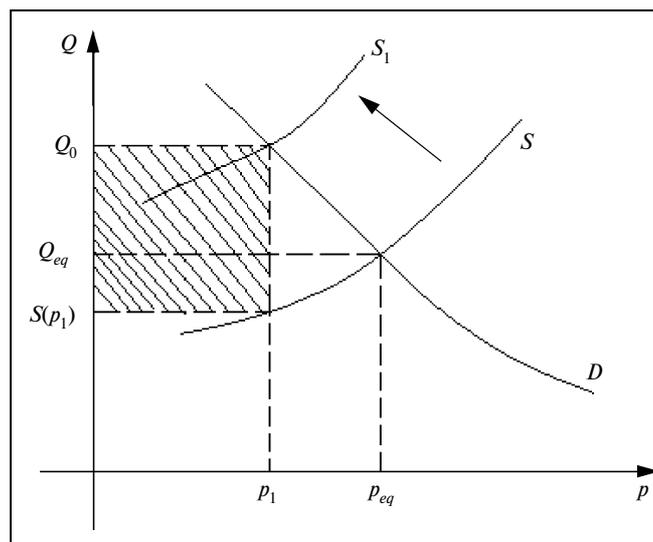


Рис. 1. Стимулирование предложения на отраслевом рынке

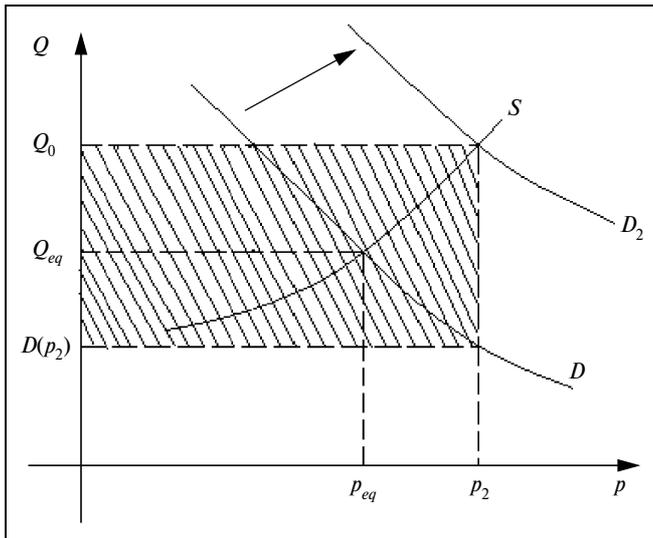


Рис. 2. Стимулирование спроса на отраслевом рынке

Стимулируя предложение, правительство тем самым смещает точку ценового равновесия в сторону понижения:  $p_1 < p_{eq}$  на рис. 1. При цене  $p_1$  производители готовы самостоятельно профинансировать лишь выпуск продукции, составляющий величину  $S(p_1)$ , а все остальное должно финансировать государство. Следовательно, требуемый в данном случае объем дотаций составит  $(Q_0 - S(p_1))p_1$ . Эта величина соответствует заштрихованной области на рис. 1.

Стимулируя спрос, правительство смещает точку ценового равновесия в область более высоких цен:  $p_2 > p_{eq}$  на рис. 2. Однако в этом случае потребители готовы заплатить столь высокую цену лишь за  $D(p_2)$  единиц данного товара, а остальное должно поддерживать правительство, компенсируя расходы потребителей. Объем дотаций в этом случае составит  $(Q_0 - D(p_2))p_2$ . Эта величина соответствует заштрихованной области на рис. 2.

Заметим, что, чем более «пологой» является кривая спроса на данном отраслевом рынке (чем менее эластичен спрос по цене) и чем «круче» кривая предложения (чем более оно эластично по цене), тем больше по площади заштрихованная область на рис. 1 и тем меньше соответствующая область на рис. 2. Поэтому теоретически возможен случай, когда заштрихованный прямоугольник на рис. 2 по площади меньше аналогичного прямоугольника на рис. 1. Если же предположить, что спрос и предложение приблизительно одинаково эластичны по цене, то объем дотаций, которые требуются для стимулирования спроса, очевидно, превысит объем дотаций, необходимых для под-

держания рынка путем стимулирования предложения.

Рынок услуг транспорта и жилищно-коммунального хозяйства, регулирование которого в России в начале 2005 г. было внезапно трансформировано от ситуации рис. 1 к ситуации рис. 2, потребовал резкого увеличения объема государственных дотаций, что обернулось всплеском индекса потребительских цен в первом квартале 2005 г. во всех регионах страны. Это значит, что инфляционные последствия так называемой монетизации льгот не были в должной мере просчитаны правительством.

Казалось бы, не все ли равно — обеспечить дотации производителю или предоставить социальные трансферты потребителю, чтобы в результате те же самые деньги попали в карманы фирм-производителей? Однако вся проблема в том, что финансовая поддержка потребителей *автоматически* перемещает равновесие на отраслевом рынке в область более высоких цен, в отличие от финансовой поддержки производителей, приводящей к противоположному результату.

Вообще говоря, в практике регулирования отраслевых рынков традиционно (и вполне справедливо) считается, что стимулирование предложения является более «экономным» способом поддержки рынка, приводящим к росту его совокупного объема. Именно так правительства практически всех стран поддерживают рынок жизненно важных продуктов питания (хлебопродукты в европейских странах, включая, естественно, Россию, рис в Японии и Китае), а также важнейших социально значимых услуг.

Вероятно, монетизация льгот в нашей стране послужит первым импульсом к проведению масштабной реформы всей системы ЖКХ, включая ее частичную приватизацию. Однако эффективность данных мер, логика которых молчаливо предполагает стремление правительства переложить модернизацию и техническое перевооружение данной сферы на плечи частного капитала, вызывает некоторые сомнения. Следует принять во внимание также физический износ эксплуатируемого жилого фонда, ускоряющийся значительными темпами даже в относительно благополучных регионах страны (например, в Москве). В силу этих обстоятельств очередную попытку правительства снизить свою социальную ответственность за последствия масштабного и длительного кризиса 1990-х гг. едва ли следует признать удачной.

Еще раз подчеркнем, что задача насыщения рынка, когда критерием его народнохозяйственной эффективности становится объем создаваемого блага, а вовсе не рентабельность, стандартна для целого ряда рынков. Наиболее серьезные пробле-

мы в этом случае начинаются тогда, когда на рынках такого рода, сопряженных с большим количеством положительных внешних эффектов, государственное стимулирование насыщения рынка влечет за собой ухудшение качества производимого блага и возникает необходимость его избирательного сокращения, что в известном смысле можно трактовать как «провал государства».

В качестве примера приведем сферу образования. Предположим, правительство пришло к выводу, что в нашей стране осуществляется перепроизводство образовательных услуг по экономическим и юридическим специальностям в ущерб подготовке инженерных кадров. Если бы развитие данного рынка в целом не стимулировалось государством, для ликвидации перепроизводства блага достаточно было бы повысить налог на соответствующий вид деятельности или поставить дополнительные рыночные барьеры входа, тем самым переместив кривую предложения на рис. 1 вправо и вниз. При этом, разумеется, рынок осуществил бы «естественный» отбор, при котором проигрывают наименее устойчивые в коммерческом отношении производители, а вовсе не те, кто создает благо более низкого качества.

Но проблема заключается в том, что система образования *в принципе* поддерживается правительством, поэтому данный способ решения проблемы оказывается для него недоступен. Таким образом, правительству в подобных ситуациях приходится осуществлять «искусственный» отбор, изобретать «нерыночные» барьеры, например, ужесточать лицензирование образовательных услуг в соответствующих областях, насильственным образом ликвидировать подготовку экономистов и юристов в технических вузах и т. п. В основе практики такого рода лежит считывание рыночных сигналов о качестве образования *правительством*, а отнюдь не потребителями данного блага, что вносит серьезные искажения в логику функционирования рассматриваемого рынка.

### **3. НАЛИЧИЕ БАРЬЕРОВ И МЕХАНИЗМ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ОТБОРА**

Наличие барьеров входа-выхода на квазимонопольных отраслевых рынках подрывает многие хорошо известные выводы экономической теории. Например, один из выводов, базирующихся на предпосылках экономики совершенно конкурентных рынков, состоит в том часто принимаемом без доказательства факте, что более рискованные активы должны быть и более доходными. Тем не менее, данный вывод имеет место лишь в случае, когда агенты абсолютно свободны в своих хозяйственных решениях (т. е. их действия ограничены

только бюджетной линией) и эти решения принимаются мгновенно и без издержек. В реальной жизни все намного сложнее. В частности, кризисная и депрессивная экономика России приучила нас к мысли о том, что банковский сектор имеет менее рискованные и более доходные активы, чем (в среднем) реальный сектор экономики. Причина этого факта заключается в том, что слишком высокие барьеры на пути перелива капитала между ними. Высоки барьеры входа в банковско-финансовый сектор и выхода из реального сектора, активы которого в депрессивной экономике нередко обременены долгами.

Барьеры входа-выхода, которые существуют в отрасли, достаточно условно можно разделить на две большие категории: стоимостные и институциональные [2].

Наличие барьеров, выступающее важным признаком квазимонопольных отраслевых рынков, нередко нарушает механизмы «благоприятного» отбора. В качестве примера укажем на тот факт, что электроламповые заводы, производящие лампы накаливания, соревнуются в *ухудшении* качества продукции, чтобы создать спрос на свою продукцию. Технические возможности давно позволяют сделать лампочки, которые будут работать несколько лет, не перегорая, однако выпуск продукции высокого качества невыгоден производителям. Неблагоприятный отбор такого рода жидется на факте наличия достаточно высоких входных барьеров в отрасль, и предприятия, вошедшие в нее, придерживаются той же стратегии, дабы окупить свои издержки.

Аналогичные проблемы, связанные с осознанным снижением качества экономических благ, нередко имеют место и в сфере услуг. В частности, в мировой литературе много раз отмечалось, что в основе профессии врача лежит неустранимое противоречие: он работает для того, чтобы не было больных, но если их не останется, его труд не будет востребован. Поэтому снижение качества благ на рынках такого рода обусловлено тем, что их создатели нередко руководствуются *принципом разумной достаточности*: они практикуют предложение благ минимально приемлемого качества, при котором эти блага еще будут пользоваться спросом. Например, врачу выгодно, чтобы его пациенты были больны, но при этом не умирали. Лишь наличие конкуренции в данных отраслях способно поколебать этот принцип. Поэтому возможность «выкорчевывания» лимонов на таких отраслевых рынках всецело зависит от возможностей преодоления барьеров входа.

В некоторых случаях наличие барьеров порождает двойственный отбор (*diverse selection*), т. е. ситуацию, когда на рынке остаются блага и хоро-



шего, и плохого качества. В частности, такая ситуация имеет место на рынке труда [3], где в роли барьеров, затрудняющих для индивида оптимальный выбор стратегии предложения труда, выступают достаточно случайные (с точки зрения экономиста) обстоятельства: социальное происхождение, воспитание, стартовые условия для получения образования, качество начальных ступеней образования, полученного индивидом, и т. д.

Еще один пример двойственного отбора, обусловленного наличием входных барьеров, представляет проблема фондовооруженности в сельском хозяйстве, где «ножницы цен» между продукцией промышленного и аграрного производства, подрывающие воспроизводственные возможности аграрного сектора страны, предопределяют сохранение слабомеханизированного ручного труда в большинстве мелких крестьянских хозяйств. Модернизация производственного процесса становится невыгодной для этих производителей ввиду опережающего роста издержек по сравнению с приращением экономического эффекта.

#### **4. НЕБЛАГОПРИЯТНЫЙ ОТБОР: НЕОБХОДИМА ЛИ АСИММЕТРИЯ ИНФОРМАЦИИ?**

Стандартная модель рынка «лимонов», связанная с асимметричностью информации, часто возникает на Интернет-рынках различных благ.

Интернет-продажи в нашей стране не столь распространены, как в других развитых странах, не только в силу недостаточного распространения самого Интернета, но и в силу недостаточного уровня стандартизации предлагаемых к продаже товаров. Иначе говоря, в Интернете покупатель вынужден делать выбор «наощупь», тогда как в условиях низкой стандартизации прежде, чем купить товар, покупателю необходимо его посмотреть, потрогать, «попробовать на зуб» и т. д. На рынках в Интернете представлены в основном товары, качество которых нельзя узнать заранее.

Слабый уровень стандартизации влечет за собой увеличение асимметрии информации в пользу продавцов, чем они порой умело пользуются. Особый сегмент составляют услуги, связанные с функционированием самого Интернета. В качестве примера приведем рынок услуг по «раскрутке» и продвижению сайтов [4].

Некоторая часть компаний, предлагающих соответствующие услуги, раскручивает сайты хорошо, а другая часть — плохо. Покупатели знают, что раскрутка в Интернете бывает двух типов, и готовы платить за плохую максимум 60 у. е., а за хорошую максимум 400 у. е. В это же время продавцы услуг хорошей раскрутки оценивают свои издержки на уровне в 300 у. е., и ниже этой планки им

опускаться невыгодно. Продавцы услуг плохой раскрутки хотят получить минимум 40 у. е.

Если предположить, что информация о качестве соответствующих услуг полная и симметричная, т. е. и покупатели, и продавцы знают о качестве услуг, предоставляемых каждым из продавцов, то возникло бы два отдельных сегмента рынка, на одном бы продавались услуги раскрутки плохого качества, на другом — хорошего. На первом рынке цена находилась бы в пределах между 40 и 60 у. е., на втором — между 300 и 400 у. е.

На самом деле информация на данном рынке асимметрична, т. е. покупатели заранее, до покупки соответствующей услуги, не имеют возможности получить информацию о ее качестве. Если исходить из того, что примерно половина компаний предоставляет услуги надлежащего качества, а другая половина — «лимоны», то среднестатистический потребитель готов заплатить за услугу среднюю арифметическую цену между 60 и 400 у. е., т. е. приблизительно 230 у. е.

В итоге компании, добросовестно выполняющие свои обязательства, не покрывают своих издержек, оцениваемых ими в 300 у. е., и уходят с рынка. На рынке остаются только продавцы услуг — «лимонов», которые поначалу получают неплохие доходы, но затем, по мере распространения информации о плохом качестве их услуг, вынуждены соглашаться на низкую плату. Тем самым, на данном рынке исчезают услуги хорошего качества, и рынок услуг по раскрутке сайтов вырождается в рынок «лимонов» с ценовым интервалом между 40 и 60 у. е.

Ситуация осложняется еще и тем, что на данном рынке внятных сигналов о качестве нет. Ни гарантии, предоставляемые производителем, ни его «общая репутация» не позволяют рассчитывать на приемлемое качество услуг.

Некоторый парадокс заключается в том, что в данном примере на рынке услуг высокого качества существуют и спрос, и предложение, и — более того! — кривые спроса и предложения пересекаются, т. е. существует цена равновесия, а самого этого рынка, тем не менее, нет, он исчезает, полностью уступая место рынку «лимонов». Это типичный пример «провала» рынка, пример того, как рыночная стихия в условиях асимметричной информации «вымывает», выбрасывает из обращения блага высокого качества и, соответственно, производителей, которые их создают.

Заметим, что классики экономической науки — Смит, Рикардо и Маркс — полагали, будто рыночная стихия посредством механизма конкурентной борьбы автоматически приводит к улучшению качества благ. Но они, как известно, исходили из предпосылок рынка совершенной конкуренции.

На квазимонопольных рынках действие тех же самых механизмов часто дает противоположные результаты.

Оказывается, весьма похожие эффекты иногда возникают и на рынках, где имеет место *симметричная неполнота* информации, т. е. ни продавцы, ни покупатели как следует не осведомлены о качестве продукции, обращающейся на рынке. Приведем характерный пример, относящийся к советской экономике 1980-х гг.

Один из важнейших видов продукции металлургической промышленности — так называемая электротехническая сталь, от качества которой непосредственно зависят производство, преобразование, передача и использование всей электроэнергии в стране. Важнейшей характеристикой качества этой стали является значение удельных магнитных потерь: чем больше это значение, тем хуже технические характеристики изделий из этой стали и больше потери электроэнергии при их эксплуатации.

Почти 90 % электротехнической стали выпускается в рулонах и, несмотря на автоматизированную технологию ее производства, ее качество отстает от требований, предъявляемых предприятиями электротехнического машиностроения и энергетики. Сертификация качества продукции, основанная на выходном контроле, неспособна адекватно отразить это качество. Выходной контроль качества на металлургических предприятиях производится вручную. Из рулона массой 3—5 т берется выборка в 1 кг. С помощью специальных проб определяются электромагнитные характеристики изготовленной стали, а затем все это отражается в сертификате. Проблема заключается в том, что в силу сложной технологии производства сталь неоднородна по своим свойствам как в пределах одного рулона, так и от рулона к рулону.

Многие предприятия электротехнической промышленности ввели входной контроль качества стали, результаты которого значительно отличались от данных сертификата. Входной контроль электротехнической стали марки 3414, используемой при производстве трансформаторов, проводился в течение четырех лет на одном из электротехнических предприятий. Результаты контроля показали, что вместо 100 % марки 3414, указанной в сертификате, фактически поставлялось 32 % низшей марки 3413, 12 % высшей марки 3415 и только 56 % — нужной [5].

Конструкторы, проектирующие трансформаторы, знают, что данные сертификата не всегда соответствуют действительности. Поэтому они ориентируются на сталь худшего качества, т. е. завышают габариты изделия при дополнительном расходе стали и цветных металлов. Зная об этом,

металлурги перестают уделять должное внимание качеству продукции и под видом продукции, соответствующей стандарту, производят сталь более низкого качества, что обходится им несколько дешевле. В результате качество поставляемой стали в течение нескольких лет неуклонно ухудшалось.

Тем самым, производители получили возможность частично переложить издержки на своих контрагентов, и на данном отраслевом рынке происходило снижение качества экономических благ. Обратим внимание на то, что шкала качества в приведенном примере была *непрерывной*, в отличие от большинства примеров такого рода, в которых продаваемый товар может быть либо «хорошим», либо «плохим».

---

## 5. ДВОЙНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ АСИММЕТРИЯ НА РЫНКЕ ТРУДА

---

Многие экономисты, защищая интересы работодателей, пишут об информационной асимметрии на рынке труда, имея в виду, что работник способен скрыть истинную информацию о своей квалификации, человеческом капитале и прочих производственных возможностях, и разрабатывают систему знаковых сигналов, на основании которых работодатель может хотя бы частично преодолеть эту асимметрию. Гораздо менее распространено теоретическое осмысление противоположной проблемы: обман работника работодателем, основанный на информационной асимметрии, подрывающей доверие работника к работодателю как в части технико-эргономических условий труда, так и в части его оплаты.

Для российского рынка труда данная проблема является одной из критически важных, в особенности с учетом того, что в настоящее время не менее 10—12 % лиц, работающих по найму на постоянной основе, работают по устной договоренности, без заключения какого-либо контракта, а на временную работу без официального оформления нанимаются намного чаще. Столь масштабная и разветвленная система неформальных институтов предоставляет работодателям широкие возможности для манипуляции, а нередко и для прямого обмана работников.

Состояние информационной инфраструктуры российского рынка труда крайне неудовлетворительное; возникающая информационная асимметрия негативно отражается, прежде всего, на наемных работниках. Наиболее уязвимое место в информационном обеспечении рынка труда — непредоставление данных о заработной плате работников. Эти сведения никогда в нашей стране не относились к категории открытых, однако в 1970—1980-х гг. появились специальные статисти-



ческие сборники, содержащие данные о средней заработной плате по отраслям народного хозяйства и динамике номинальных и реальных доходов населения. С началом рыночных реформ ситуация вновь изменилась в худшую сторону. Предприятия относят такие сведения к сфере коммерческой тайны. В статистических публикациях невозможно найти данные о заработной плате по тем или иным профессиям, специальностям и квалификациям, необходимые для принятия субъектами рынка труда оптимальных экономических решений.

Для многих западных стран, в частности, США, публикация подробной статистики о зарплате является нормой. Эти данные служат ориентиром в переговорах между работниками (или защищающими их права профсоюзами) и предпринимателями об условиях оплаты труда. В последние годы многие субъекты Федерации обнародуют сведения о прожиточном минимуме, однако для большинства населения непонятна методика его определения. Крайне редко в печати приводятся расчеты минимального потребительского бюджета, бюджетов среднего и высокого достатка, статистика по занятости и безработице. Данные о численности, уровне и продолжительности безработицы стали появляться в начале 1990-х гг., но зачастую они были неполными и противоречивыми. Публикуемая сегодня статистика, которая основывается только на сведениях о численности безработных, официально зарегистрированных в территориальных органах Федеральной государственной службы занятости населения, искажает реальную картину (по расчетам Международной организации труда их в несколько раз больше). В результате потенциальные работники не могут оптимизировать свое экономическое поведение.

В условиях жесткой конкуренции фирмы стремятся расширять границы коммерческой тайны и под предлогом сохранения последней нередко закрывают данные, имеющие немаловажное значение для ищущих место работы. Попытки правительств ряда стран (в том числе и России) законодательно обязать работодателей предоставлять соответствующую информацию не слишком эффективны, поскольку соответствующие нормативные акты не предусматривают ответственности за их нарушение.

Важнейшими экономическими и социальными последствиями информационной асимметрии и неполноты информации на рынке труда являются неадекватность экономического поведения субъектов рынка труда, усиление дискриминации при найме на работу и в оплате труда по полу и возрасту, рост фрикционной безработицы [6].

Наёмные работники (профсоюзные организации), лишённые необходимой информации о со-

стоянии рынка труда (заработной плате, занятости, безработице), подчас принимают неоптимальные экономические решения. Они оказываются в невыгодном положении при проведении переговоров с работодателями и представителями государства об условиях оплаты труда, нередко предъявляют не вполне обоснованные требования к уровню оплаты труда. Работодатели, в свою очередь, допускают ошибки в кадровой политике, установлении ставок оплаты труда и т. д.

Рост фрикционной безработицы наносит определенный ущерб как самим работникам, так и народному хозяйству, ибо требует дополнительных транзакционных затрат, связанных с перемещением работников, увольнением и наймом на работу, снижением производительности труда перед уходом со старого места работы и в начальный период на новом (хотя при определенных обстоятельствах добровольное перемещение рабочей силы позволяет каждому полнее реализовывать свой личностный потенциал и повышать эффективность труда). Если бы работники обладали исчерпывающей информацией о состоянии рынка труда, ставках оплаты труда и условиях на других предприятиях, то многие из них, вероятнее всего, не принимали бы опрометчивых решений о смене места работы. В результате минимизировались бы экономические и социальные потери, связанные с перемещениями рабочей силы, а уровень фрикционной безработицы не вышел бы за свои естественные границы (2—3 % экономически активного населения).

## **6. ИНФОРМАЦИОННАЯ АСИММЕТРИЯ НА ФИНАНСОВОМ РЫНКЕ: ПРОБЛЕМА БЕЗБИЛЕТНИКА И МОРАЛЬНЫЙ РИСК**

Главным образом благодаря информационной асимметрии финансовые рынки не похожи на рынок совершенной конкуренции. В распределении фондов между различными частями рынка возникает «проблема агента» между кредитором (принципалом) и заемщиком (агентом), так как последний обладает частной информацией по поводу потенциальной возможности и намерений возврата кредита, а также риска его инвестиционного проекта. Таким образом, оптимальный «долговой» контракт обычно включает в себя дополнительные затраты для кредитора — так называемые внешние финансовые надбавки. Они в значительной мере унифицированы по объему и состоят из затрат на изучение претендента на кредит, мониторинга поведения заемщика и включают в себя премию за кредитный риск. Наличие нерационального выбора и морального риска влечет за собой дополнительные затраты для кредитора, которые, впрочем, весьма различаются в каждом конкретном

случае. Устранение этого информационного несовершенства может быть обеспечено самим рынком, главным образом с помощью финансовых посредников и — отчасти — государственного вмешательства.

Вместо отдельных инвесторов, которые должны были бы выполнять различные контролирующие функции, требующие существенных затрат ресурсов и времени, появляются финансовые посредники. Они специализируются на выполнении именно этих функций. Их деятельность характеризуется экономией от масштаба, она снижает совокупные затраты на производство информации, являющиеся внешними финансовыми издержками. Однако, как показали авторы работы [7], изучавшие эти информационные функции, возможное увеличение в несколько раз размеров «естественной монополии» в данной области может оказаться технически расточительным.

Как бы то ни было, главная причина существования финансовых посредников заключается в их способности бороться с проблемой «безбилетника» в производстве информации. Эта проблема состоит в наличии агентов, которые хотят воспользоваться общественным благом без адекватного возмещения издержек по созданию этого блага. В основе проблемы безбилетника лежит фундаментальное свойство общественных благ — их неисключаемость в потреблении, невозможность ограничить потребление этих благ какими бы то ни было частными агентами. Например, человек, идущий по хорошо освещенной улице, потребляет общественное благо (освещение) вне зависимости от того, внес ли он вклад в производство этого блага.

Информация имеет характеристики общественного блага, при этом использование информации одним агентом не уменьшает ее доступности для других. Более того, из-за внедрения все новых технических средств распространения информация становится все более дешевой, и это нередко приводит к тому, что перекрыть кому бы то ни было возможность доступа к ней и ее потребления оказывается слишком дорого. Следовательно, по отношению к потреблению информации также возникает проблема безбилетника.

Защита от безбилетника может рассматриваться как некий хозяйственный ресурс, и «покупка» каждой дополнительной единицы этого ресурса выгодна до тех пор, пока предельная выгода  $MR$  от этой покупки превосходит предельные издержки  $MC$  на ее совершение (слева от точки  $Q_{\text{опт}}$  на рис. 3). Объем ресурса, при котором предельные издержки на приобретение дополнительной единицы ресурса сравниваются с предельной выго-

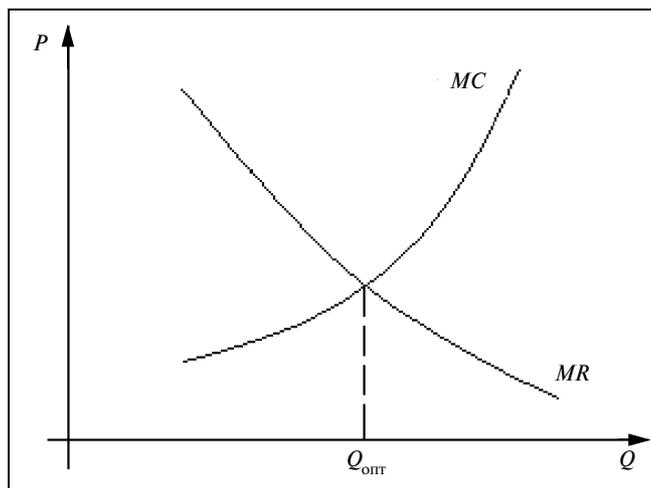


Рис. 3. Оптимизация «охоты» за безбилетником

дой от использования этой единицы, является точкой оптимума.

Таким образом, «охота» за безбилетником подчиняется «золотому правилу»  $MC = MR$ : она продолжается до той поры, пока предельные затраты на поиск и наказание безбилетника не превысят предельную выгоду от этого поиска и наказания, включая моральное удовлетворение от наведения порядка и торжества справедливости (что бы это ни означало с точки зрения экономики), а также включая положительный внешний эффект «воспитания» (адаптации), заключающийся в том, что другие безбилетники, поведение которых пока что остается безнаказанным, возможно, предпочтут не подвергаться дополнительному риску наказания.

Наличие множества людей, которые не платят за информацию, и создает в данном случае проблему «безбилетника». Это обстоятельство упреждает рынок от производства «чрезмерно большого» количества информации, которое было бы достаточно для решения проблемы асимметрии информации. Перепроизводство информации на рынке может потребовать вмешательства правительства, направляющего усилия на регулирование источников информации.

На финансовых рынках большое число вкладчиков имеет недостаточно стимулов, чтобы специально выделять ресурсы для контроля поведения инвестора. Финансовые посредники, в некотором смысле группирующие риски частных вкладчиков, напротив, будут иметь достаточно причин, чтобы инвестировать капитал в поиск и распространение необходимой информации. Тем самым, они станут действовать в качестве уполномоченных представителей многих частных вкладчиков, которые инвестируют свои средства с помощью посредников. Этот механизм работает при условии, что деятель-



ность посредников по производству информации приносит им прибыль выше среднего уровня [8].

Банки играют специфическую роль, аналогичную роли финансовых посредников, в процессе перераспределения средств от плохо информированных вкладчиков к инвесторам, которые обладают средне- и высококачественной информацией, но платежеспособность которых обычно трудно оценить. Пытаясь произвести оценки такого рода, частные вкладчики сталкиваются с проблемой раздробленности информации, так как осуществление данной функции своими силами влечет за собой наличие множества «частных» информационных потоков. Когда банки выдают частные ссуды вместо покупки ценных бумаг, тем самым они инвестируют в информацию о кредитном риске.

Выдавая частные вклады, банки также могут улучшить дисциплину поведения инвесторов и избежать морального риска. Эти функции оказываются более сложными в случае рыночного финансирования, например, эмиссии корпоративных облигаций. Разграничения такого рода составляют суть дискуссии между сторонниками так называемой модели банковского финансирования, которая доминирует в континентальной Европе, и приверженцами модели рыночного финансирования деловых инвестиций в англо-саксонском мире. Это в какой-то мере объясняет различия, существующие в законодательстве разных стран.

Роль рынка и финансовых посредников в предоставлении информации нуждается в правительственном вмешательстве. Довод в пользу вмешательства государства в операции на финансовых рынках главным образом опирается на проблему информационной асимметрии, которая порождает риск мошенничества, халатности, неадаптивности и т. д. [9]. Финансовые услуги в этом смысле оказываются доверительными благами, качество которых трудно оценить заблаговременно. В любом случае, информационные проблемы могут быть смягчены частным производством и продажей информации.

Сущность общественных благ связывает проблему «безбилетника» и проблему производства информации, вследствие чего финансовые посредники не могут полностью решить возникающие информационные проблемы. Дополнительный общественный контроль необходим, например, на городских рынках сельскохозяйственной продукции: здесь недостаточно усилий крупных посредников, группирующих многочисленные частные риски. Таким образом, одной из главных причин государственного регулирования является необходимость защиты потребителя от информации, распространение которой может привести к краху. Своевременность и точность информации

необходимы для того, чтобы дать возможность участникам рынка принять правильное финансовое решение. Например, одна из задач государственного регулирования состоит в том, чтобы обязать заемщика предоставлять разностороннюю информацию кредиторам о своей деятельности, согласно условиям предоставления кредита, и институционально обеспечить выполнение этой договоренности. Правила предоставления информации о деятельности могут также иметь целью обеспечение равных подходов ко всем финансовым потребителям.

Финансовые институты, с одной стороны, помогают смягчить информационные проблемы, но с другой, значительная часть финансовых активов, выпущенных финансовыми институтами, является информационно-интенсивной. Это касается, в частности, банков, где вкладчики не информируются о качестве и риске портфеля ценных бумаг. Асимметрия информации создает проблему «морального риска», так как финансовые институты могут совершать действия, выходящие за рамки интересов инвесторов, например, банку может быть выгодно установить высокие проценты по вкладам, при этом предоставляя высокорискованные кредиты. Более того, проблема «безбилетника» обостряется в случае, когда большое число инвесторов не слишком заинтересовано в затрате ресурсов для контроля за финансовыми институтами. В частности, банковские обязательства зачастую находятся в руках «наивных» вкладчиков, у которых нет достаточных стимулов для осуществления контролирующих и мониторинговых функций.

В любом случае, эти затраты морального риска могут быть уменьшены при помощи соответствующих институциональных механизмов, и финансовые институты могут быть ограничены в свободе действий по существу выпускаемых ими обязательств. От банков, выпускающих краткосрочные обязательства, требуется, чтобы их поведение учитывало угрозу отзыва вкладчиками своих капиталовложений с сокращенными сроками уплаты процентов. Если, тем не менее, такого рода требования по краткосрочным обязательствам являются застрахованными (например, как в случае обязательного страхования вкладов), проблема морального риска может даже возрасти. Только незастрахованные кредиторы, которые не могут «выйти из игры», будут иметь достаточно стимулов для контроля над рисками, которые они берут на себя.

Государственное регулирование необходимо для обеспечения дополнительных путей снижения затрат морального риска для отдельных вкладчиков. Провалам рынка можно пытаться противодействовать, требуя, чтобы финансовая информация предоставлялась вовремя и была достоверной. Это может быть также достигнуто путем повыше-

ния ответственности за действия банков со стороны держателей их акций, например, путем введения правил, требующих инвестирования большего количества собственных средств банков, что приведет к увеличению доли средств частных вкладчиков в инвестируемом капитале банков.

## 7. ИМПЕРАТИВНЫЙ РЕСУРС И НЕБЛАГОПРИЯТНЫЙ ОТБОР

В условиях слабо специфицированных или слабо защищенных правомочий прав собственности у агентов возникает альтернатива между инвестированием в хозяйственную деятельность и инвестированием в так называемый *императивный ресурс*, в формировании, перераспределении и удержании правомочий.

Естественно, что логика этого инвестирования определяется наличием *сравнительных* преимуществ по отношению к другим агентам, населяющим ту же самую рыночную нишу. Иначе говоря, агенты, у которых инвестиции в хозяйственную деятельность более эффективны по сравнению с другими агентами, станут инвестировать именно в нее. Другие агенты, которые не рассчитывают добиться успеха в конкурентной борьбе в хозяйственной сфере, станут инвестировать в императивный ресурс [10], если сочтут инвестиции такого рода более эффективными по сравнению с инвестициями в хозяйственную деятельность. Например, в сельском хозяйстве агенты, хозяйствующие на худших землях, предпочтут тратить средства не на то, чтобы повысить урожайность на своей земле, а на то, чтобы захватить и удерживать под контролем лучшие земли, если институциональная система в принципе предоставляет им такую возможность.

Многочисленные примеры такого рода связаны со сферой государственного заказа. Отрасли хозяйства, в которых госзаказ сулит миллиардные прибыли, как правило, оказываются в сфере действия инвестиций в императивный ресурс. Например, в оборонной промышленности США, где разработка вооружений традиционно является сферой действия частных корпораций, конкурируют друг с другом не образцы вооружений как таковые, а мощь этих корпораций, стремящихся обеспечить получение выгодного контракта от государства, в том числе и с использованием императивного ресурса (от промышленного шпионажа и подкупа членов комиссии вплоть до убийств и диверсий на производстве компании-конкурента). В результате многие удачные разработки уступают место худшим.

Приведем один из ярких примеров такого рода [11]. Во времена холодной войны (начало 1950-х гг.)

Канаде понадобился скоростной высотный перехватчик для прикрытия от атак советских дальних стратегических бомбардировщиков. Кроме того, командование НАТО решило воспользоваться этим заказом, и после принятия самолета на вооружение канадскими вооруженными силами выдать заказ на этот самолет для перевооружения своего уже устаревшего парка истребителей. В результате победитель тендера должен был получить контракт на огромную сумму. Основными участниками конкурса были крупная американская корпорация и только что созданная маленькая канадская фирма. Проекты соответственно назывались «СтарФайтер» и «АвраЭрроу». После начала испытаний оказалось, что канадская машина по всем показателям намного превосходит своего разрекламированного соперника. Но огромная военно-промышленная корпорация не могла позволить уйти столь выгодному контракту. Несколько канадских машин разбились, члены контрольной комиссии получили взятки, главный конструктор канадской фирмы подвергся настоящей травле, из-за чего он был вынужден уйти в отставку. И, естественно, тендер выиграли американцы, хотя в Канаде и было сильное протестное движение в различных слоях населения, но это не помогло.

В результате вооруженные силы нескольких стран получили истребитель «СтарФайтер», который американские пилоты прозвали «алюминиевым гробом». По важнейшим летным параметрам он существенно уступал аналогичным видам вооружений Советской Армии. Каждый шестой «СтарФайтер», поступивший на вооружение американской армии, потерпел катастрофу и разбился. В результате менее чем через 10 лет после начала серийного производства вооруженные силы США отказались от использования этой машины. За 20 лет серийного производства было собрано 2615 «СтарФайтеров» (включая многочисленные модификации, созданные в различных странах НАТО), из которых по самым скромным подсчетам более 600 разбились в авариях и катастрофах [12].

В данном случае возможность инвестиций в императивный ресурс повлекла за собой получение худших образцов вооружений и военной техники от более сильной фирмы (вследствие чего напрямую страдает обороноспособность страны). Данная ситуация иллюстрирует также и тот факт, что транснациональные корпорации, используя различные рычаги давления, вторгаются во внутренние дела других государств и при этом совершают тяжкие преступления.

Возможность инвестирования в императивный ресурс приводит к следующим эффектам на соответствующем отраслевом рынке.

- Поскольку к перераспределению правомочий сильнее стремятся наименее эффективные в хо-



зяйственной деятельности агенты, то в результате активы перераспределяются в пользу *наименее эффективных* собственников. Тем самым, рыночная стихия в данном случае осуществляет неблагоприятный отбор (*adverse selection*). Над этим эффектом следует серьезно задуматься государственным ведомством, осуществляющим приватизацию объектов государственной собственности. Практика многих стран мира (Латинская Америка, Восточная Европа, страны — бывшие республики Советского Союза) показывает, что опасность формирования слоя неэффективных собственников вполне реальна.

- Эффективно хозяйствующие агенты, дабы избежать перспективы потери активов, вынуждены изымать часть инвестиций из своей хозяйственной деятельности и направлять их на покупку императивного ресурса, защищающего их правомочия. В некоторых случаях они вынуждены *все* усилия направлять на императивный ресурс, забыв о какой бы то ни было хозяйственной деятельности, — в противном случае они не смогут удержать свои правомочия. Тем самым, они оказываются в ситуации углового решения.
- Вложения в императивный ресурс нередко выступают чистыми потерями для общества — в том смысле, что экономические блага, созданные в результате инвестиций в императивный ресурс, для достижения иных целей непригодны. Например, это относится ко всем видам вооружений, относительно которых К. Маркс в свое время справедливо заметил, что нация, создающая оружие, тем самым без всякой пользы выбрасывает часть своего капитала.

Можно, разумеется, утешаться тем, что производство дверей и замков, систем противоугонной автомобильной сигнализации, услуг страхования, охраны и поддержания правопорядка и, наконец, создание вооружений, а также иные составные части рынка императивных ресурсов вносят несомненный вклад в ВВП, а та часть этого рынка, которая входит в трансформационный сектор экономики, косвенно способствует развитию производительной силы общественного труда. Например, многие технологии, возникшие в оборонном секторе, имеют двойное назначение и могут быть использованы для повышения эффективности различных производственных процессов, не связанных с рынком императивного ресурса. Однако неумолимая реальность заключается в том, что оружие может потребляться только в ходе боевых действий, а при помощи замков и дверей едва ли создашь иной общественно полезный продукт, если, конечно, не использовать их в качестве декоративных элементов интерьера.

Поскольку совокупные инвестиции в императивный ресурс возрастают, то тем самым снижается совокупная эффективность хозяйственной деятельности общества, падает средняя норма прибыли. Это, в свою очередь, вызывает нарастание инфляции издержек, тормозит экономический рост и углубляет структурные диспропорции в экономике.

Проблема заключается в том, что в реальной жизни *ни на одном рынке* правомочия прав собственности нельзя считать абсолютно жестко очерченными и полностью защищенными от посягательств на перераспределение. Тем самым, «провалы» в институциональной системе, обеспечивающей защиту правомочий, приводят к тому, что *любой* рынок потенциально является рынком «лимонов», на котором выживают лишь наименее эффективные агенты.

В сильно криминализованной экономической системе, где относительно слабо защищены правомочия прав собственности, может наступить момент, когда практически все агенты инвестируют исключительно в императивный ресурс. Иначе говоря, одни агенты стремятся к перераспределению правомочий на ресурсы, другие — к их удержанию, но никто (или почти никто) не применяет эти ресурсы в хозяйственной деятельности. Когда все заняты тем, как отобрать и поделить (либо защититься от этого процесса), хозяйственная жизнь общества останавливается или, во всяком случае, сильно тормозится.

Государственная власть способна сделать инвестиции в императивный ресурс менее эффективными, но полностью защитить правомочия она не в силах. Захват чужих объектов собственности в тех или иных формах (воровство, кражи, грабежи, в частности, в виде строительства финансовых пирамид или недружественных захватов компаний — рейдерства) существует в любой современной экономической системе.

Более того, государство само активно участвует в перераспределении правомочий и нередко его иницирует (приватизация, национализация активов, изъятие земель для государственных нужд, конфискация имущества и проч.). Тем самым, проблема инвестиций в императивный ресурс принимает иные очертания — они осуществляются также и в форме лоббирования интересов частных экономических агентов на уровне принятия государственных решений, что также является одной из форм императива к перераспределению правомочий или защиты правомочий от перераспределения. Не снижая общности, можно утверждать, что ни в одной экономической системе, основанной на господстве частной собственности, нет и не может быть агента, который был бы полностью свободен от проблемы инвестиций в им-

перативный ресурс. Даже при безграничном доверии к окружающим людям, время от времени запереть входную дверь на замок, мы надеемся, вы все-таки не забываете.

Задача государства заключается в том, чтобы сформировать ясное представление агентов о рутинных, шаблонах поведения, вызывающих перераспределение правомочий, а также об алгоритмах защиты правомочий прав собственности. Иначе говоря, важная роль государства состоит в том, чтобы (насколько это возможно) перевести институциональные механизмы перераспределения правомочий в сферу действия *формальных* институтов.

Решение этой задачи, разумеется, позволяет правительству навести порядок во взаимоотношениях частных агентов, но не спасает их от произвола, творимого самим государством. В этом смысле государство конкурирует с частными агентами на рынке императивного ресурса (на рынке перераспределения правомочий), и в этой конкуренции позиция государства тем сильнее, чем более формализована сфера действия императивного ресурса. Здесь государству всегда приходится выбирать между стабильностью сформированных им институтов и необходимостью оперативного регулирования экономики, направленного на решение как текущих, так и долгосрочных задач.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы предприняли краткий (и далеко не полный) обзор многочисленных проблем, связанных с возникновением неблагоприятного отбора на современных отраслевых рынках и управлением им. Институциональное осмысление данной группы проблем позволяет выделить ситуации «провалов рынка» и «провалов государства» при регулировании неблагоприятного отбора. Один из основных выводов заключается в том, что квазимонопольные рынки, как правило, не содержат «встроенных» механизмов, действие которых приводит к автоматическому преодолению обратного отбора. В подавляющем большинстве случаев разумное и

своевременное вмешательство государства способно нейтрализовать наиболее разрушительные последствия существования «рынка лимонов» и обеспечить реализацию общественных интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Нижегородцев Р.М.* Россия перед выбором: ключевые макроэкономические проблемы и возможные пути их решения // Экономика развития региона: проблемы, поиски, перспективы: Ежегодник. В 2-х т. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2006. — Вып. 7. — Т. 1.
2. *Нижегородцев Р.М.* Регулирование квазимонопольных рынков и проблема равновесия фирм // Вестник экономической интеграции. — 2007. — № 1.
3. *Нижегородцев Р.М.* Diverse selection: двойственный отбор на рынке труда и проблема накопления человеческого капитала // Проблема человеческого капитала: теория и современная практика: Материалы Вторых Друкеровских чтений / Под ред. Р.М. Нижегородцева. — М.: Доброе слово, 2007.
4. *Павлов А.* Асимметрия по качеству в Интернете // Сделай выбор. — 2005. — № 10.
5. *Олигин-Нестеров В.И., Самуйлов В.М.* НТР: система машин и человек. — М.: Экономика, 1990.
6. *Бедерникова Н., Гендлер Г.* Информационная асимметрия на российском рынке труда // Человек и труд. — 2001. — № 2. — С. 141—142.
7. *Dewantripont M., Tirole J.* The prudential regulation of banks. Cambridge (MA). — London: MIT Press, 1994.
8. *Миллер Р., Ван Хус Д.* Современная теория денег и банковского дела. — М., 2001.
9. *Добрынская В.* Проблема асимметрии информации на финансовом рынке // Управление корпоративными финансами. — 2004. — № 3.
10. *Цуриков В.И.* Влияние институциональных факторов на поведение субъекта экономических отношений: Автореф. дисс. ... д-ра экон. наук. — Кострома, 2007.
11. *Мамаев Р.Х.* Инновационные проблемы реформирования оборонного комплекса России // Информационная экономика и концепции современного менеджмента: Материалы Первых Друкеровских чтений / Под ред. Р.М. Нижегородцева. — М.: Доброе слово, 2006.
12. <<http://www.airwar.ru/enc/fighter/fl104.html>>.

e-mail: [bell44@rambler.ru](mailto:bell44@rambler.ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.А. Новиковым. □

### Читайте в следующем номере

- Барладян И.И., Кузнецов А.В., Мандель А.С.** Анализ критических значений параметров и моделирование управляемой системы массового обслуживания
- Беляев А.А., Котов С.С., Столбов В.Ю.** Модель управления ресурсами предприятия при дискретном производстве
- Дранко О.И., Лунякова С.В.** Модель оптимизации долгосрочной деятельности человека
- Ермолаев А.И., Абдикадыров Б.А.** Оптимизация размещения скважин на нефтяных залежах на основе алгоритмов целочисленного программирования
- Жирнов В.И., Федосеев С.А., Агарков А.И.** Модель управления заказами в рамках единой информационной системы предприятия
- Силаев А.В.** Исследование приближенной модели большой космической конструкции в целях анализа динамики системы управления ее ориентацией с помощью цифрового моделирования
- Тиме И.В., Анушвили Н.А.** Модель ценообразования на олигополистических рынках при сегментации потребителей на устойчивые группы
- Целиков А.В.** Аналитическая система информационного обеспечения управления здравоохранением на муниципальном уровне



# МОДЕЛИ ПОЛЕЗНОСТИ И РИСКА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДЕГРАДИРУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ<sup>1</sup>

В.В. Баранов, В.М. Матросов

Центр исследований устойчивости и нелинейной динамики  
при Институте машиноведения РАН, г. Москва

Построены модель полезности, определяющая априорные предпочтения на альтернативах управления, и модель риска при выборе альтернатив диагностики ситуаций, ориентированные на применения в задачах управления деградирующими системами.

## ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассмотрена проблема управления эффективностью и безопасностью деградирующих систем. Методология ее формализации предусматривает задание двух основных носителей априорной информации. Это — переходная функция  $q^g(S|S \times Y)$ , определяющая стохастическую закономерность динамики состояний под воздействием управлений из множества  $Y$ , и функция полезности  $w^g(Y \times S \times X)$ , определяющая априорные предпочтения на управляющих альтернативах из множества  $Y$  с учетом их зависимости от состояний  $s \in S$  и ситуаций  $x \in X$ , как от условий, и от набора общесистемных альтернатив  $g \in G$ , как от параметров. Модель переходной функции  $q^g(S|S \times Y)$  построена в работе [2]. В настоящей статье ставится задача построения модели полезности для альтернатив, использование которых предусмотрено методологией работы [1].

В настоящее время существуют различные аксиоматические теории полезности [3—6 и др.]. Принятые в них аксиомы по своей сути являются нормативными принципами, определяющими концепцию рационального поведения (но не правилами реального поведения). Основные результаты этих теорий состоят в доказательстве существования функции «полезности», упорядочивающей

альтернативы из заданного множества по предпочтительности, и утверждения, что рациональное поведение в условиях риска (неопределенности исходов) можно описать с помощью полезности и субъективной вероятности в соответствии с формулой: «разумный человек принимает решения в ситуациях, включающих риск, в соответствии с ожидаемой полезностью, где ожидание основывается на субъективной вероятности». Однако необходимо учитывать, что субъективные вероятности являются лишь средством выражения уверенности в наступлении некоторого исхода и ничем больше. В силу этого аксиоматические теории полезности пригодны исключительно для задач однократного принятия решений (точнее, в единичных событиях). В работе же [1] неопределенность порождается случайностью состояний, имеющих объективную динамическую природу. Поэтому требуется иной подход к полезности, основанный на специфике условий, постулируемых методологией [1].

## 1. МОДЕЛЬ ПОЛЕЗНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ АЛЬТЕРНАТИВ

Согласно методологии [1] проблема управления деградирующими системами многоаспектная и состоит из следующих основных аспектов: «производства дохода», диагностики ситуаций работоспособности, обеспечения работоспособности, обеспечения безопасности и «структурный» аспект. По каждому такому аспекту постулируется задание соответствующего множества альтернатив. В частности, по аспекту производства дохода

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 05-08-33574 а.

задается множество управляющих альтернатив  $Y = U \times P$ , где  $U$  — множество альтернатив использования объекта,  $P$  — множество альтернатив восстановления работоспособности. При этом постулируется, что альтернативы из множества  $Y$  выбираются в зависимости от ситуаций работоспособности  $x \in X$  с учетом ограничений  $Y_x \subset Y$  на допустимость в зависимости от ситуаций  $x \in X$ .

Альтернативами диагностики являются ситуации  $x \in X$ , которые выбираются в зависимости от состояния  $s \in S$  с учетом ограничений  $X_s \subset X$  на допустимость в зависимости от состояния  $s \in S$ .

По аспекту безопасности задается соответствующее множество  $V$  альтернатив, которые выбираются независимо от состояний и ситуаций в качестве общего для них параметра.

Наконец, по структурному аспекту задается множество альтернатив  $H \times \Theta = \Gamma$ , где  $H$  — множество собственно *структурных* альтернатив, а  $\Theta$  — множество допустимых значений *шага принятия решений*, который является структурным параметром. Пара альтернатив  $\gamma \in H \times \Theta$  выбирается также независимо от состояний и ситуаций в качестве общего для них параметра.

По способу выбора альтернатив из множеств  $V$  и  $H \times \Theta$  их можно объединить в общее множество  $V \times H \times \Theta = G$ , элементы которого условимся называть *общесистемными* альтернативами.

Наша задача состоит в построении функции полезности по каждому аспекту проблемы. Построение нужных функций основывается на следующем постулате.

**Постулат полезности.** Пусть на множестве альтернатив определена количественная мера предпочтительности. Если такая мера однозначно упорядочивает альтернативы из заданного их множества, то она является *функцией полезности*. ♦

Исходя из этого постулата, по аспекту «производства дохода» будем строить априорную количественную меру предпочтительности на управляющих альтернативах из множества  $Y$  в виде функции  $w^g(Y \times S \times X)$ , которая при фиксированных  $s \in S$  и  $x \in X$  удовлетворяет условиям вида:

$$w^g(y'|s, x) - w^g(y|s, x) \begin{cases} > 0 \Rightarrow y' \succ y, \\ = 0 \Rightarrow y' \approx y, \end{cases} \quad (1.1)$$

где запись  $y' \succ y$  обозначает, что альтернатива  $y'$  предпочтительней альтернативы  $y$ , а  $y' \approx y$  — эквивалентность альтернатив.

Содержательный смысл требуемой функции будем связывать с «прибылью», определяемой разностью между «доходом», который может быть получен от использования объекта с альтернативой  $u \in U$ , и «расходами» на применение альтернативы восстановления работоспособности  $p \in P$  и всех

других альтернатив. Для определения дохода потребуем задания интенсивности  $c(u|h) > 0$  начисления дохода в единицу времени в зависимости от альтернативы использования  $u \in U$  при условии структурной альтернативы  $h \in H$ . Если задан интервал времени  $(0, \theta]$ ,  $\theta \in \Theta$ , то на этом интервале должен быть получен доход размером

$$d(u|\theta, h) = c(u|h) \cdot \theta > 0. \quad (1.2)$$

Однако на интервале времени  $(0, \theta]$  в случайный момент времени  $\xi < \theta$  с положительной вероятностью может произойти отказ, в силу которого объект *отключается от режима использования*. В таком случае будут иметь место *потери* дохода:  $d(u|\theta, h) - c(u|h) \cdot \xi = c(u|h)(\theta - \xi) > 0$ .

С учетом этого априорную эффективность альтернативы  $u \in U$  естественно характеризовать математическим ожиданием дохода на заданном интервале времени  $(0, \theta]$ , который условимся называть «ожидаемым» доходом. Ясно, что ожидаемый доход будет зависеть от функции распределения времени до отказа, которая в общем случае зависит от выбора управляющей альтернативы  $y = (u, p) \in U \times P = Y$ , структурной альтернативы  $h \in H$  и альтернативы безопасности  $v \in V$ . Непосредственно же ожидаемый доход зависит от альтернативы использования  $u \in U$ , шага времени  $\theta \in \Theta$ , структурной альтернативы  $h \in H$  и интенсивности начисления дохода  $c(u|h)$ .

С другой стороны, применение альтернатив  $p \in P$ ,  $v \in V$  и  $h \in H$  требует определенных затрат, которые могут извлекаться лишь из «ожидаемого» дохода. С учетом этого эффективность альтернативы  $y = (u, p) \in U \times P = Y$  естественно оценивать разностью между ожидаемым доходом на интервале времени  $(0, \theta]$  и суммарными затратами, связанными с практическим применением альтернатив  $p \in P$ ,  $v \in V$  и  $h \in H$ . В терминах экономики подобная разность имеет смысл «прибыли». При этом она оценивается «до» реального процесса управления. Тем самым прибыль здесь носит *априорный* характер. Очевидно, что она может служить естественной количественной мерой предпочтительности на альтернативах из множества  $Y = U \times P$ , которая при этом вполне однозначно упорядочивает альтернативы из заданного их множества в соответствии с условием (1.1). Тогда согласно постулату полезности подобная априорная прибыль может служить в качестве априорной функции «полезности» на альтернативах из множества  $Y = U \times P$ .

В качестве итога этих рассуждений сформулируем следующее предложение.

**Предложение 1.1.** Априорная прибыль, определенная разностью между ожидаемым доходом и расходами на применение выбранных альтерна-



тив, является функцией «полезности» на альтернативах из множества  $Y = U \times P$ . ♦

Остается определить требуемую функцию полезности в явном виде. С этой целью обратимся к схеме управления, описанной в работе [2]. Согласно этой схеме в некоторый момент времени наблюдается состояние  $s \in S$  и выполняется диагностика ситуаций  $x = x(s) \in X$ . По результатам диагностики выбирается пара альтернатив  $y = (u, p) \in Y$ , где  $u \in U$  — альтернатива использования,  $p \in P$  — воздействие восстановления работоспособности. Одновременно с этим выбирается шаг принятия решений  $\theta \in \Theta$ , структурная альтернатива  $h \in H$  и альтернатива безопасности  $v \in V$ . На интервале времени  $(0, \theta]$  объект используется в соответствии с выбранной альтернативой  $u \in U$ .

Согласно предположениям [2] динамика состояний описывается однородным марковским процессом. В этих условиях каждый момент наблюдения состояния можно рассматривать в качестве начального. Схема управления постулирует, что в каждый такой момент воздействие восстановления работоспособности  $p \in P$  мгновенно переводит наблюдаемое состояние  $s \in S$  в новое «улучшенное» состояние  $z < s$  по правилу:

$$z(s, p) = (1 - \varepsilon(p)) s, \quad (1.3)$$

где  $\varepsilon(p) \in [0, 1]$  — мера эффективности восстановления работоспособности, заданная для воздействия  $p \in P$ . Из полученной точки  $z = z(s, p) \in S$  на выбранном шаге времени  $\theta \in \Theta$  происходит эволюция состояний с закономерностью, задаваемой переходной функцией  $q^{(\mu, \lambda)}(\theta, S|z)$ , определенной выражением (15) в работе [2] в предположении, что  $t = \theta \in \Theta$ ;  $\mu = \mu(u, v, h)$ ;  $\lambda = \lambda(u, v, h)$ . Поскольку на выбранном интервале времени  $(0, \theta]$  объект используется для извлечения дохода с альтернативой  $u \in U$  и интенсивностью дохода  $c(u|h) > 0$ , то это должно принести доход  $d(u|\theta, h) = c(u|h) \cdot \theta > 0$ . Но, как отмечалось, на интервале  $(0, \theta]$  с положительной вероятностью может произойти отказ, в силу которого объект отключается от режима использования. Тем самым реальная длительность использования является случайной величиной вида  $\zeta(z|\theta) = \min\{\zeta(z), \theta\} \leq \theta$ , где  $\zeta(z) > 0$  — случайное время до отказа при заданном состоянии  $z \in S$ , полученном по правилу (1.3). Пусть в этих условиях задана функция распределения  $F_\xi(t|z)$  случайной величины  $\xi(z)$ , имеющая плотность  $f(t|z)$ . Тогда ожидаемую длительность использования объекта можно описать усеченным математическим ожиданием

$$\tau(\theta|z) = M\{\xi(z)|\theta\} = \int_0^\theta t f(t|z) dt. \quad (1.4)$$

Согласно результатам работы [2] требуемая плотность имеет вид  $f(t|z) = \Lambda(z)e^{-\Lambda(z)t}$ , где параметр-функция  $\Lambda(z) > 0$  является интенсивностью отказов, зависящей от фиксированного состояния  $z \in S$ . В рассматриваемых условиях величина  $\tau(\theta|z)$  выражается явно в виде:

$$\tau(\theta|z) = \frac{1}{\Lambda(z)} - e^{-\Lambda(z)\theta} \left[ \theta + \frac{1}{\Lambda(z)} \right]. \quad (1.5)$$

Согласно снова же работе [2] параметр-функция  $\Lambda(z)$  является дробно-рациональной вида

$$\Lambda(z) = \frac{\lambda}{1-z}, \quad z \in [0, 1], \quad \lambda > 0.$$

При этом, как отмечалось выше, параметр  $\lambda$  является функцией альтернатив  $(u, v, h) \in U \times V \times H$ , т. е.  $\lambda = \lambda(u, v, h)$ . С учетом этого параметр-функция  $\Lambda(z)$  представляется в виде:

$$\Lambda(z|u, v, h) = \frac{\lambda(u, v, h)}{1-z}, \quad z \in [0, 1], \\ (u, v, h) \in U \times V \times H.$$

Отсюда следует, что определенная выражением (1.5) ожидаемая длительность использования объекта  $\tau(\theta|z)$  зависит от набора альтернатив  $(u, v, h) \in U \times V \times H$  и окончательно выражается в виде:

$$\tau(\theta|u, v, h)(z) = \\ = \frac{1-z}{\lambda(u, v, h)} - e^{-\frac{\lambda(u, v, h)\theta}{1-z}} \left[ \theta + \frac{1-z}{\lambda(u, v, h)} \right]. \quad (1.6)$$

Таким образом, ожидаемая на интервале времени  $(0, \theta]$  длительность использования объекта  $\tau(\theta|u, v, h)(z)$  зависит от набора альтернатив  $(u, v, h) \in U \times V \times H$  и состояния  $z \in S$ . Однако состояние  $z \in S$  здесь задано не произвольно, а вычисляется по формуле (1.3). При этом используемое в формуле (1.3) управляющее воздействие  $p \in P$  выбирается в зависимости от ситуации  $x \in X$ , которая в свою очередь выбирается в зависимости от наблюдаемого состояния  $s \in S$ . Поэтому на самом деле ожидаемая на интервале времени  $(0, \theta]$  длительность использования объекта, кроме альтернатив  $(u, v, h)$ , зависит также от наблюдаемого состояния  $s \in S$ , ситуации  $x = x(s)$  и управления  $p = p(x)$  в соответствии с условиями вида

$$\tau(\theta|p, u, v, h)(s, x) = \\ = \begin{cases} \tau(\theta|u, v, h)(z), & u = u(x), x = x(s), \\ z = z(s, p) = (1 - \varepsilon(p)) \cdot s; & p = p(x). \end{cases} \quad (1.7)$$

Из полученного результата следует, что на выбранном интервале времени  $(0, \theta]$ ,  $\theta \in \Theta$  при заданном наборе альтернатив  $(u, p) \in U \times P$  и  $(v, h) \in$

$\in V \times H$  вместо предполагаемого по формуле (1.2) дохода  $d(u|\theta, h) = c(u|h) \cdot \theta$  можно рассчитывать в среднем лишь на величину

$$d(u, p|\theta, v, h)(s, x) = c(u|h) \cdot \tau(\theta|p, u, v, h)(s, x), \quad (1.8)$$

где  $\tau(\theta|p, u, v, h)(s, x) < \theta$ . Подобный доход мы условились называть «ожидаемым».

Согласно предложению 1.1 функция полезности на альтернативах из множества  $Y = U \times P$  имеет смысл прибыли, определяемой разностью между ожидаемым доходом и расходами на применение выбранных альтернатив. Ожидаемый доход определен выражением (1.8). Остается уточнить структуру соответствующих расходов и способ их задания. Для этого будем исходить снова же из условий методологии [1]. Согласно им воздействие восстановления работоспособности  $p \in P$  выбирается в зависимости от ситуации  $x \in X$ . С учетом этого в общем случае естественно полагать, что затраты на применение воздействия  $p \in P$  также зависят от ситуации  $x \in X$ . Будем описывать их некоторой функцией  $r(x, p) > 0$ . Однако согласно условиям той же методологии [1] альтернативы безопасности  $v \in V$  и структурные альтернативы  $h \in H$  выбираются независимо от состояний и ситуаций. Поэтому и затраты на их применение не обязаны зависеть от переменных состояния и ситуации. С учетом этого затраты на применение альтернатив безопасности  $v \in V$  будем описывать некоторой функцией  $\rho(v) > 0$ , а на применение структурных альтернатив  $h \in H$  функцией  $\Delta(h) > 0$ .

Выполненные построения определяют функцию полезности разностью вида:

$$w^{(\theta, v, h)}((u, p)|s, x) = d(u, p|\theta, v, h)(s, x) - r(x, p) - \rho(v) - \Delta(h). \quad (1.9)$$

Однако заметим, что такая разность рассматривается при условии отсутствия отказа (т. е.  $s \neq 1$ ).

Если же имеет место отказ (т. е.  $s = 1$ ), то он сопровождается *ущербом*, часто имеющим катастрофический характер. Будем описывать его средней величиной  $\chi > 0$  и рассматривать в качестве дополнительной статьи расходов при условии отказа. С учетом этого функция полезности на альтернативах  $(u, p) \in U \times P = Y$  окончательно определяется условиями вида:

$$w^{(\theta, v, h)}((u, p)|s, x) = \begin{cases} d(u, p|\theta, v, h)(s, x) - r(x, p) - \rho(v) - \Delta(h), & s \neq 1, \\ d(u, p|\theta, v, h)(s, x) - r(x, p) - \rho(v) - \Delta(h) - \chi, & s = 1. \end{cases} \quad (1.10)$$

С учетом обозначений  $y = (u, p) \in U \times P = Y$  и  $g = (\theta, v, h) \in \Theta \times V \times H = G$  полученную функцию будем записывать в виде  $w^g(y|s, x)$  либо, в общем случае,  $w^g(Y \times S \times X)$ ,  $g \in G$ .

Таким образом, выполненные построения определяют явный вид функции  $w^g(y|s, x)$ , имеющей смысл «прибыли», которая порождает предпочтения на альтернативах  $y \in Y$  в соответствии с условиями (1.1). При этом по построению такая функция определена «до» реального процесса управления. Тем самым она носит априорный характер. Тогда согласно предложению 1.1 она является *функцией полезности* на множестве  $Y$  управляющих альтернатив.

Полученный результат окончательно сформулируем следующим утверждением.

**Утверждение 1.1.** *Функция  $w^g(Y \times S \times X)$  вида (1.10) является априорной функцией полезности на множестве  $Y$  управляющих альтернатив. При этом она зависит от состояний и ситуаций  $(s, x) \in S \times X$ , как от условий, и от набора альтернатив  $g = (\theta, v, h) \in G$ , как от параметров.* ♦

**Замечание 1.1.** Поскольку функция полезности  $w^g(Y \times S \times X)$  является априорной, то, вообще говоря, она не может служить в роли критерия качества управляющих решений в реальном процессе управления. Но она является носителем априорной информации, на основании которой можно строить критерии качества управляющих решений нужной структуры. ♦

## 2. МОДЕЛЬ ПОЛЕЗНОСТИ СТРУКТУРНЫХ АЛЬТЕРНАТИВ

Согласно утверждению 1.1 функция полезности  $w^g(Y \times S \times X)$  определена на множестве  $Y$  управляющих альтернатив и зависит от общесистемных альтернатив  $g = (\theta, v, h) \in \Theta \times V \times H = G$ , как от параметров. Но при этом она не является функцией полезности на множестве альтернатив  $G$ . Тем не менее, с ее помощью можно построить функцию полезности по части альтернатив  $\Gamma = H \times \Theta \subset G$ , где  $H$  — множество *структурных* альтернатив, а  $\Theta$  — множество допустимых значений *шага принятия решений*, который является *структурным параметром*. Там, где не требуется различать содержание альтернатив, пару  $\gamma = (h, \theta) \in H \times \Theta$  будем называть структурной альтернативой. При этом функцию полезности будем обозначать  $w^{(\gamma, v)}(Y \times S \times X)$ .

С учетом этих обозначений положим, что заданы некоторые вероятностная мера на множестве состояний  $s \in S$  и правило диагностики  $\delta: S \rightarrow X$ . Тогда функция полезности  $w^{(\gamma, v)}(Y \times S \times X)$  может быть преобразована к виду  $w^{(\gamma, v)}(Y \times X)$ , при котором она не зависит от переменной состояния  $s \in S$  (см. утверждение 2.1 в работе [1]). Пусть также задано некоторое правило управляющих решений, определенное однозначным отображением  $\pi: X \rightarrow Y$ . В этих предположениях функцию полезности



обозначим  $w^{(\gamma, \nu)}(\pi(X)|\delta)$ . Напомним, что структурная альтернатива  $\gamma \in \Gamma$  выбирается независимо от ситуации  $x \in X$ . Тогда для описания качества структурной альтернативы  $\gamma \in \Gamma$  функцию  $w^{(\gamma, \nu)}(\pi(X)|\delta)$  можно преобразовать к виду, при котором она не зависит от переменной ситуации  $x \in X$ . Очевидным образом для этого достаточно преобразовать ее в сумму вида

$$\mu(\gamma|\pi, \delta, \nu) = \sum_{x \in X} (\pi(x)|\delta), \quad \gamma \in \Gamma. \quad (2.1)$$

При фиксированных  $\pi, \delta$  и  $\nu \in V$  такая функция позволяет уже вполне однозначно упорядочить структурные альтернативы  $\gamma \in \Gamma$  по предпочтительности в соответствии с условием:

$$\mu(\gamma'|\pi, \delta, \nu) - \mu(\gamma|\pi, \delta, \nu) \begin{cases} > 0 \Rightarrow \gamma' > \gamma, \\ = 0 \Rightarrow \gamma' \approx \gamma. \end{cases}$$

Тогда в соответствии с постулатом полезности функция  $\mu(\gamma|\pi, \delta, \nu)$  вида (2.1) может служить в качестве функции полезности на множестве структурных альтернатив  $\Gamma$ . Этим установлена справедливость следующего утверждения.

**Утверждение 2.1.** При заданных отображениях  $\delta: S \rightarrow X$  и  $\pi: X \rightarrow Y$  функция  $\mu(\gamma|\pi, \delta, \nu)$  вида (2.1) является функцией полезности на множестве  $\Gamma$  структурных альтернатив. ♦

**Замечание 2.1.** Суммарный эффект полезности  $\mu(\gamma|\pi, \delta, \nu)$  вида (2.1) зависит от правил управления  $\pi$  и диагностики  $\delta$ , которые подлежат выбору. Поэтому функция  $\mu(\gamma|\pi, \delta, \nu)$  может быть определена лишь в реальном процессе управления. Но тем самым она не является *априорной*. Однако это не отменяет возможности ее применения в роли критерия качества структурных альтернатив в реальном процессе управления. ♦

### 3. МОДЕЛИ ПОЛЕЗНОСТИ АЛЬТЕРНАТИВ ДИАГНОСТИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ

Методология управления, развитая в работе [1], предусматривает оценку угроз утраты работоспособности в силу процессов деградации. Подобные оценки называются *ситуациями*. Их множество  $X$  конечно и они нуждаются в «диагностике» в зависимости от наблюдаемого состояния  $s \in S$ . При этом альтернативами диагностики являются сами ситуации. Поэтому требуется критерий, который играл бы роль априорной функции полезности, упорядочивающей альтернативы по предпочтительности при их выборе в зависимости от наблюдаемого состояния  $s \in S$ . Требуемый критерий определяется следующими соображениями.

Методология [1] предусматривает задание ограничений  $[Y_x \subset Y]$  на допустимость управляющих

альтернатив в зависимости от ситуаций  $x \in X$  и ограничений  $[X_s \subset X]$  на допустимость альтернатив диагностики в зависимости от состояний  $s \in S$ . Пусть задана функция полезности  $w^g(Y \times S \times X)$  вида (1.10). Наконец, пусть фиксировано состояние  $s \in S$ . В этих условиях очевидным наилучшим выбором альтернатив диагностики и управления является пара  $(x_s, y_s)$ :

$$w^g(y_s|s, x_s) = \max_{y \in Y_x} \max_{x \in X_s} w^g(y|s, x). \quad (3.1)$$

Однако на самом деле здесь состояние  $s \in S$  является случайным и вероятностная мера на множестве состояний не задана. Эти условия порождают неопределенность условий выбора ситуаций и управляющих альтернатив. В силу этого пара альтернатив  $(x_s, y_s)$ , выбранная из условия (3.1), в реальном процессе управления совсем не обязательно является «наилучшим выбором». Тем не менее, по построению априори она «потенциально наилучшая».

Предположим, что в этих условиях при заданном состоянии  $s \in S$  выбрана некоторая пара  $(x, y) \neq (x_s, y_s)$ . Определим тогда функцию вида:

$$\begin{aligned} r^g(x|s, y) &= |w^g(y|s, x) - \max_{y \in Y_x} \max_{x \in X_s} w^g(y|s, x)| = \\ &= |w^g(y|s, x) - w^g(y_s|s, x_s)|, \quad s \in S, \quad x \in X. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Из априорных соображений ясно, что такая функция может описывать лишь «сожаления» по поводу выбора решения, отличного от потенциально наилучшего. Отсюда следует, что при выборе альтернатив диагностики в любом случае естественно стремиться к минимизации подобного сожаления. С учетом этого функцию  $r^g(x|s, y)$  вида (3.2) естественно рассматривать в качестве риска потерь полезности, определяющего априорные предпочтения на альтернативах диагностики в соответствии с условием:

$$r^g(x'|s, y) - r^g(x|s, y) \begin{cases} < 0 \Rightarrow x' > x, \\ = 0 \Rightarrow x \approx x. \end{cases}$$

Тем самым такая функция является априорной функций полезности на множестве альтернатив диагностики с той лишь особенностью, что она имеет смысл *риска потерь полезности*.

По определению функция полезности  $w^{(\gamma, \nu)}(Y \times S \times X)$  вида (1.10) зависит от альтернатив безопасности  $\nu \in V$ , как от параметра. В этих условиях возможны два варианта построения количественного критерия предпочтительности альтернатив безопасности. Один вариант можно основывать на включении альтернативы безопасности

в состав параметров функции полезности и оценивать ее качество совместно со структурными альтернативами с использованием суммарного эффекта полезности вида (2.1). Второй вариант имеет место в тех условиях, когда требования безопасности являются *доминирующими*. В таком случае возникает необходимость введения специального критерия качества альтернатив безопасности. В роли такого критерия может служить вероятность возникновения «кризисной» ситуации, включающей отказ. Такая вероятность зависит от выбора, в том числе альтернативы безопасности. Тогда альтернативу безопасности естественно выбирать из условия минимизации вероятности кризисной ситуации в каждый момент принятия решений  $t = 1, 2, \dots$ . Для получения нужной вероятности требуется строить модель стохастической динамики ситуаций. Такая модель построена в работе [7]. Ограничения на объем публикации не позволяют изложить ее более подробно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [1] развита методология формализации и решения проблемы управления эффективностью и безопасностью деградирующих систем, которая предусматривает задание функции полезности в качестве одного из основных носителей априорной информации об условиях принятия решений. В методологии [1] функция полезности используется в неявном виде. В настоящей работе требуемая функция полезности построена в явном виде. Кроме того, в работе [2] построена модель динамики деградации, определяющая переходную функцию управляемого процесса также в явном виде. Вместе эти функции задают базу априорной информации, необходимую для практического решения задачи в соответствии с методологией [1].

Как было отмечено во Введении, существуют различные аксиоматические теории полезности, ориентированные на задачи принятия решений в условиях неопределенности, порождающих риск исхода [3—6 и др.]. Необходимым инструментом решения таких задач являются функция полезности и субъективные вероятности, которые служат средством выражения уверенности в наступлении некоторого исхода. В методологии же [1] неопределенность порождается случайностью состояний, имеющих объективную динамическую природу. В этих условиях необходима иная концепция полезности, отражающая специфику условий методологии [1]. Такая концепция развивается в настоящей работе. Она исходит из предположения, что функция полезности имеет экономический смысл «прибыли», определяемой разностью между ожидаемым доходом от использования объекта и расходами на практическое применение выбранных

альтернатив. При этом такая функция полезности строится «до» реального процесса управления, т. е. она является *априорной*. Тем не менее, полученная функция полезности позволяет строить критерии качества управляющих решений в реальном процессе управления, отвечающие всем аспектам рассматриваемой в работе [1] проблемы, в том числе критерий качества структурных альтернатив, критерий риска для выбора альтернатив диагностики ситуаций работоспособности, а также критерий риска «кризиса» для выбора альтернатив безопасности.

Полученная в настоящей работе функция полезности открывают достаточно богатые возможности решения проблем, содержание которых далеко выходит за рамки сформулированной в работе [1] задачи. Действительно, если структура фиксирована, то система является деградирующей. В таком случае работает методология [1], которая предусматривает возможность изменения структуры системы и ее выбора. При этом структурная альтернатива допускает широкую интерпретацию. С другой стороны, функция полезности предусматривает задание интенсивности дохода  $c(u|h)$ , зависящей от структурной альтернативы  $h \in H$ . Очевидно, что интенсивность дохода  $c(u|h)$  можно интерпретировать как производительность системы в шкале доходов при заданной структуре  $h \in H$ . С учетом такой интерпретации методология [1] открывает возможность решения не только задач управления производительностью систем с фиксированной либо перенастраиваемой структурой, но также и задач управления развитием, удовлетворяющего требованиям эффективности и устойчивости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Матросов В.М., Баранов В.В. Проблема превентивной безопасности. Модель и методы принятия решений // Проблемы управления. — 2006. — № 5. — С. 2—11.
2. Баранов В.В., Матросов В.М. Модель динамики в задачах управления деградирующими системами // Там же. — 2007. — № 4. — С. 2—7.
3. Savage L.J. The foundations of statistics. — N.-Y.: Dover, 1972.
4. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. — М.: Наука, 1970.
5. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. — М.: Наука, 1978.
6. Пфанцгаль И. Теория измерений. — М.: Мир, 1976.
7. Баранов В. В. Процессы принятия решений, мотивированных интересами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

e-mail: 901-510-49-44@skylink.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским. □



# ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

А.А. Кочкаров<sup>(1)</sup>, М.Б. Салпагаров<sup>(2)</sup>, Л.М. Эльканова<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва;

<sup>(2)</sup>Карачаево-Черкесская государственная технологическая академия, г. Черкесск

Исследовано явление разрушения информационных, электроэнергетических, транспортных и коммуникационных систем со сложной структурой. Предложена теоретико-графовая (дискретная) модель структурного разрушения. Предложены различные критерии (критерий полного разрушения, компонентный критерий, критерий связности, диаметральный критерий) выхода системы из строя при структурном разрушении. Рассмотрены сценарии структурного разрушения систем при различных эпицентрах.

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования большинства отраслей экономики государства зависит от пространственной распределенности и разветвленности ее коммуникационных сетей (электроэнергетических, информационных, водо- и тепло-снабжающих и т. п.). Чем шире зона покрытия коммуникационных сетей, тем выше конкурентоспособность соответствующей отрасли экономики как на внутреннем рынке государства, так и за его пределами.

Сети с большой зоной покрытия требуют, с одной стороны, больших затрат на обеспечение штатного функционирования. С другой стороны, такие коммуникационные сети имеют сложную многоэлементную структуру с нетривиальным набором связей, что существенно повышает риск возникновения в них чрезвычайных и внештатных ситуаций. Кроме того, сбои в функционировании коммуникационных сетей имеют значительные последствия, выходящие за пределы самих сетевых систем, в которых произошли сбои.

Ряд аварий в электроэнергетических системах в крупных городах России (Москва, 2005 г.), Европы (Лондон, 2003 и 2006 гг.; Париж, 2006 г.) США и Канады (Детройт, Нью-Йорк, Кливленд, Оттава,

Торонто, 2003 г.), показал, что развитие чрезвычайных ситуаций в коммуникационных системах с сетевой структурой происходит по «принципу домино» (в случае электроэнергетических систем — это веерные отключения). Один вышедший из строя объект (элемент системы) сильно повышает вероятность аварии на остальных, что приводит к возникновению лавины аварий. О последствиях таких аварий красноречиво свидетельствует следующий факт.

14 августа 2003 г. в ряде крупнейших городов восточного побережья США и Канады — Детройте, Нью-Йорке, Кливленде, Оттаве, Торонто и др. — произошло девятисекундное отключение электро-снабжения, приведшее к веерным отключениям электроэнергии на площади более 24 тыс. кв. км и получившее название «Блэкаут-2003». Причина — перегрузка на энергетическом каскаде Ниагара — Мохок (на границе США и Канады). Авария затронула более 50 млн чел. в восьми штатах США и провинции Онтарио Канады, привела к остановке более 100 электростанций, в том числе 22-х атомных реакторов. Ликвидация последствий аварии заняла более 30-ти часов. Сумма нанесенного США финансового ущерба составила не менее 6 млрд. долл. США.

Нередки чрезвычайные ситуации и в России, в сетях тепло-, водо- и газопроводного транспорта. Во многих случаях причиной аварий служит изношенность самих сетей и узлового оборудования. Предотвращение, прогнозирование и профилак-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-01-00618) и РГНФ (проект № 05-03-03188).

тика чрезвычайных ситуаций [1, 2] с далеко идущими последствиями в сетевых системах со сложной структурой требуют новых исследовательских подходов в моделировании с учетом всех структурных особенностей моделируемой системы.

Описанная в настоящей работе *математическая модель структурного разрушения сложной системы* представляет собой дополнение к модели распространения внешних воздействий по структуре системы [3]. Эти модели в схеме развития чрезвычайных ситуаций (иницирование ЧС → развитие ЧС → выход ЧС за пределы системы) описывают первый и второй этапы.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Изменения, происходящие в структуре сложной системы, могут быть описаны простейшими теоретико-графовыми операциями [4]: стягиванием ребра, удалением (добавлением) ребра, удалением (добавлением) вершины. Изменения структуры системы могут быть разовыми, а могут быть постоянными (периодическими, регулярными). Для последнего случая разумно ввести понятие *структурной динамики* — изменение структуры системы с течением времени. Несомненно, для описания структурной динамики лучше всего подходит аппарат теории графов [4].

Структурные изменения в сложных системах могут иметь как позитивный характер, когда в системе появляются новые элементы, улучшающие ее функционирование, так и негативный, когда из строя по различным причинам выходят элементы системы, что существенно ухудшает или останавливает работу всей системы.

Существует ряд моделей и задач, для описания которых используются потоки в сетях и на графах [5]. Потоками в сетях моделируют автотранспортное движение, перевозку товаров по железным дорогам, перекачку жидкости и газа по сети трубопроводов от источника до пункта потребления и т. д. Но все эти модели и задачи не учитывают возможности внезапного прекращения функционирования узловых элементов сетей (развязки автомобильных и железных дорог, станций высокого давления, трансформаторов и т. п.), а это часто приводит к внештатным ситуациям, не описываемым этими моделями. Нередко отказ одного узлового элемента системы приводит к череде отказов в системе (каскадному отключению), вследствие чего из строя выходит вся система.

Обозначим через  $G = (V, E)$  граф, соответствующий структуре исследуемой системы,  $V$  — множество вершин, соответствующее элементам системы, а  $E$  — множество ребер, соответствующее

связям между элементами системы. Каждой вершине  $v \in V$  припишем веса  $w(v)$  и  $\bar{w}(v)$ , отражающие *текущую загрузку и предельную загрузку* элемента системы. В случае, когда текущая загрузка  $w(v)$  элемента системы достигает предельного значения  $\bar{w}(v)$ , то элементы системы выходят из строя. А проходящие через него потоки перераспределяются по «соседним» элементам системы. Выход из строя элемента системы в теоретико-графовой терминологии соответствует удалению из графа системы вершины с инцидентными ей ребрами. А перераспределение весов в тривиальном случае соответствует равному разделению веса  $\bar{w}(v)$  удаленной вершины по вершинам, смежным с удаляемой.

При выходе из строя одного или нескольких элементов системы возможны несколько сценариев дальнейшего развития событий. Один из них, если система функционирует в *предельном состоянии*, т. е. загрузка элементов близка к предельному значению, то возможен «быстрый» переход системы в критическое состояние. Структурное разрушение, вообще говоря, процесс динамический. Не нарушая общности, будем считать, что  $w_t(v)$  — текущая загрузка вершины  $v \in V$  в момент времени  $t = 0, 1, 2, \dots, T, \dots$ . Если через  $\tilde{V}_t = \{\tilde{v}_j^t\} \subseteq V$ ,  $j = 1, 2, \dots, |\tilde{V}_t|$ , обозначить множество вершин, вышедших из строя в момент времени  $t$ , т. е. те, у которых  $w_t(v_j) \geq \bar{w}(v_j)$ , а через  $\xi(\tilde{v}_j^t) = \{v_{i_j}^t\}$  — *окружение вершины  $\tilde{v}_j^t$*  (или множество вершин, смежных с вершиной  $\tilde{v}_j^t$ ),  $|\xi(\tilde{v}_j^t)| = \deg \tilde{v}_j^t$ ,  $i_j = 1, 2, \dots, |\xi(\tilde{v}_j^t)|$ , то процесс структурного разрушения формально описывается следующим образом.

В момент времени  $t = 0$  необходимо произвести проверку по всем вершинам  $v \in V$ , и сформировать множество  $\tilde{V}_1$  из вершин, для которых справедливо  $w_0(\tilde{v}_j) \geq \bar{w}(\tilde{v}_j)$ . Во все последующие моменты времени  $t = 1, 2, \dots, T, \dots$  следует воспользоваться правилом

$$w_{t+1}(v_{i_j}^j) = w_t(v_{i_j}^j) + \varepsilon_j \bar{w}(\tilde{v}_j),$$

$$i_j = 1, 2, \dots, |\xi(\tilde{v}_j^t)|, \quad j = 1, 2, \dots, |\tilde{V}_t|.$$

Если  $w_{t+1}(v_{i_j}^j) \geq \bar{w}(v_{i_j}^j)$ , то вершина  $v_{i_j}^j$  удаляется из графа  $G$  и добавляется в множество  $\tilde{V}_{t+1}$ .



Коэффициент  $\varepsilon_j$  — параметр распределения загрузки. Он может зависеть от различных факторов, в простейшем случае он равномерно распределяет предельную загрузку удаляемой вершины по соседним, т. е. для каждой вершины  $\tilde{v}_j$  он вычисляется как  $\varepsilon_j = 1/\deg \tilde{v}_j^f$ . Структурное разрушение при таком значении параметра распределения загрузки будем называть *равномерным*.

Процесс структурного разрушения может продолжаться до тех пор, пока система не перейдет в *критическое состояние*  $\mathfrak{Z}$ , т. е., когда перестанет выполнять возложенные на нее функции. Критическое состояние  $\mathfrak{Z}$  определяется, исходя из особенностей моделируемой системы. Например, система может считаться пребывающей в критическом состоянии, если из ее структуры удален хотя бы один элемент (вершина), или система может считаться функционирующей, если ее структура после удаления элементов все еще остается связанной. Далее будут рассмотрены различные *критерии отказа* системы (перехода в состояние выхода системы из строя) или, иначе, *критерии разрушения*.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Основная задача моделирования структурного разрушения системы — выяснить, при каких условиях система может перейти в критическое состояние (начальные причины повреждения системы могут быть как внутренними, так и внешними). Переход системы в критическое состояние означает, что в системе начался процесс структурного разрушения, но это не значит, что система окончательно прекратила функционировать. Систему можно считать вышедшей из строя только в том случае, когда изменения, произошедшие в структуре системы, будут соответствовать критериям отказа. Поэтому одной из основных характеристик в модели структурного разрушения будет служить *время  $T_{cr}$  структурного разрушения*, отражающее длительность самого процесса структурного разрушения. Время  $T_{cr}$  соответствует продолжительности процесса структурного разрушения от момента первого удаления (выхода из строя) элемента системы до момента остановки процесса разрушения или отказа самой системы.

Поскольку построенная модель структурного разрушения системы непосредственно связана с типом структуры самой системы, важно исследовать системы с различными типами структур, найти связь между типом структуры системы и временем структурного разрушения при переходе системы в критическое состояние.

Нельзя подменять друг другом два представления о *сложности систем*. Сложность системы может заключаться и в сложности ее динамического поведения (самоорганизация, динамический хаос, бифуркации, случайное поведение и т. п.), и в сложности структуры связей между ее элементами. Часто системы совмещают в себе эти оба представления о сложности, хотя не всегда исследователям удается жестко определить понятия о сложности системы в поведении и в структуре. Нетривиален этот вопрос и для исследуемого в настоящей работе процесса структурного разрушения системы.

Для исследования процесса структурного разрушения систем предлагается использовать следующие критерии отказа.

*Критерий полного разрушения  $\sigma_0(k)$* . Система считается вышедшей из строя, если в системе выйдут из строя все элементы (будут удалены все вершины графа — структуры системы). Критерий полного разрушения  $\sigma_0(k)$  зависит от одного параметра  $k$  — числа удаленных вершин в начальный момент времени структурного разрушения.

*Критерий связности  $\sigma_1(k)$* . Система считается вышедшей из строя, если нарушена связность ее структуры при удалении вершин. Критерий связности  $\sigma_1(k)$  зависит от одного параметра  $k$  — числа удаленных вершин в начальный момент времени структурного разрушения.

*Компонентный критерий  $\sigma_2(k, m)$* . Система считается вышедшей из строя, если число компонентов в структуре системы при ее разрушении станет равным (или больше) заданного числа  $m$ . Компонентный критерий  $\sigma_2(k, m)$  выхода системы из строя зависит от двух параметров:  $k$  — числа удаленных вершин в начальный момент времени структурного разрушения и  $(m - 1)$  — максимально допустимого числа компонентов структуры при ее разрушении.

*Диаметральный критерий  $\sigma_3(k, D)$* . Система считается вышедшей из строя, если диаметр хотя бы одного из компонентов структуры системы в процессе разрушения окажется меньше заданного значения  $D$ . Диаметральный критерий  $\sigma_3(k, D)$  выхода системы из строя зависит от двух параметров:  $k$  — числа удаленных вершин в начальный момент времени структурного разрушения и  $D$  — минимально допустимого диаметра компонентов структуры при ее разрушении.

Множество  $\Phi(G)$  элементов, вышедших из строя (удаленных из структуры) в момент времени  $t = 1$ , будем называть *множеством эпицентров структурного разрушения*. В критериях  $\sigma_0(k)$ ,  $\sigma_1(k)$ ,  $\sigma_2(k, m)$  и  $\sigma_3(k, D)$  число  $k$  соответствует числу эпицентров структурного разрушения системы.

В настоящей работе раскрыты некоторые аспекты равномерного структурного разрушению ациклических графов (цепей и деревьев) с равными значениями начальных загрузок  $w_0(v)$  и равными значениями предельных загрузок  $\bar{w}(v)$  для всех их вершин.

### 3. СТРУКТУРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГРАФОВ-ЦЕПЕЙ

#### 3.1. Структурное разрушение графов-цепей по критерию связности

Всякий связный ациклический граф называется *деревом*. Частным случаем дерева  $G$  является граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ . Множество вершин  $V_C$  графа-цепи  $C$  состоит из двух висячих вершин — концов цепи со степенями, равными единице, и внутренних вершин со степенями, равными двум.

Рассмотрим граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ , с равными для всех его вершин  $v \in V_C$  весами  $w_0(v)$ ,  $\bar{w}(v)$ .

Ввиду того, что всякий граф-цепь утратит связность при удалении хотя бы одной невисячей (внутренней) вершины, справедлива

**Лемма 1.** *Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ , будет разрушен по критерию  $\sigma_1(k)$ , где  $1 \leq k \leq n - 2$ , при удалении хотя бы одной невисячей вершины. ♦*

#### 3.2. Структурное разрушение графов-цепей по компонентному критерию

**Лемма 2.** *Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ ,  $n \geq 3$ , будет разрушен по критерию  $\sigma_2(k, t)$ , где  $2 \leq t \leq (n + 1)/2$  при нечетном  $n$  и  $2 \leq t \leq n/2$  при четном  $n$ , если число попарно несмежных внутренних вершин-эпицентров равно  $k = t - 1$ . ♦*

**Доказательство.** Удаление одной невисячей вершины графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$  непременно приведет к распадению его на два компонента  $C' = (V_{C'}, E_{C'})$  и  $C'' = (V_{C''}, E_{C''})$ . «Простейшим» компонентом в таком случае может быть граф-вершина. Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ ,  $n \geq 3$ , имеет  $(n - 1)/2$  попарно несмежных внутренних вершин, если  $n$  — нечетное, и  $n/2 - 1$ , если  $n$  — четное. Удаление из графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$  всех попарно несмежных внутренних вершин приведет к появлению  $(n + 1)/2$  компонентов в первом случае и  $n/2$  — во втором, причем каждый компонент будет представлять собой граф-вершину. ♦

#### 3.3. Структурное разрушение графов-цепей по диаметальному критерию

Пусть  $H = (W, Q)$  есть  $n$ -вершинный связный граф [4]. Длина кратчайшей цепи, соединяющей пару вершин  $w, v \in W$ , называется расстоянием между вершинами  $w$  и  $v$  [4] и обозначается через  $\rho(w, v)$ . Заметим, что введенное таким образом расстояние удовлетворяет известным аксиомам евклидовой метрики.

Для фиксированной вершины  $w \in W$  величина  $\varepsilon w = \max_{v \in W} \rho(w, v)$  называется *эксцентриситетом*

вершины  $w \in W$ . Максимальный среди всех эксцентриситетов вершин графа  $H = (W, Q)$  называется *диаметром* графа  $H$  и обозначается через  $d(H)$ , т. е.  $d(H) = \max_{v \in W} \varepsilon(w)$ . Если пара вершин  $u, w \in W$

соединяется кратчайшей цепью длины  $\rho(u, w) = d(H)$ , то эта цепь называется *диаметральной*. Вершина  $w$  называется *периферийной*, если  $\varepsilon(w) = d(H)$ . *Радиус* графа  $H$  обозначается через  $r(H)$  и вычисляется по формуле  $r(H) = \min_{w \in W} \varepsilon(w)$ . Вершина  $w$

называется *центральной*, если  $\varepsilon(w) = r(H)$ . *Центром* графа  $H$  называется множество центральных вершин.

**Лемма 3.** *Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ ,  $n \geq 3$ , будет разрушен по критерию  $\sigma_3(1, r(C))$  при удалении центральной вершины (т. е. когда эпицентром является центральная вершина). Причем диаметры появившихся в результате структурного разрушения компонентов будут равны  $r(C) - 1$  и  $d(C) - r(C) - 1$ . ♦*

**Доказательство.** Для графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ , расстояние между двумя его висячими вершинами  $v_1$  и  $v_2$  совпадает с диаметром и длиной графа-цепи  $\rho(v_1, v_2) = d(C) = n - 1$ , а сами вершины  $v_1$  и  $v_2$  являются периферийными.

Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ , имеет центр, состоящий из двух вершин, если число вершин цепи  $|V_C| = n$  — четное, и состоящий из одной вершины, если число вершин  $|V_C| = n$  — нечетное. В первом случае  $r(C) = n/2$ , во втором  $r(C) = (n - 1)/2$ . Удаление центральной вершины графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$  приведет к распадению его на две цепи  $C_1 = (V_{C_1}, E_{C_1})$  и  $C_2 = (V_{C_2}, E_{C_2})$  с соответствующими диаметрами  $d(C_1) = r(C) - 1$  и  $d(C_2) = d(C) - r(C) - 1$ . Очевидно, что при нечетном  $n$  диаметры компонентов  $C_1 = (V_{C_1}, E_{C_1})$  и  $C_2 = (V_{C_2}, E_{C_2})$  будут равны:  $d(C_1) = d(C_2)$ , а при  $n$  четном  $d(C_1) > d(C_2)$ . ♦



Для эксцентриситета всякой внутренней вершины  $v \in V_C$  графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$  справедливо неравенство  $r(C) \leq \varepsilon(v) < d(C)$ . Так же, как и в случае с удалением из графа-цепи центральной вершины, удаление любой внутренней вершины приведет к распадению графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$  на два компонента  $C_1 = (V_{C_1}, E_{C_1})$  и  $C_2 = (V_{C_2}, E_{C_2})$ , с соответствующими диаметрами  $d(C_1) = \varepsilon(v) - 1$  и  $d(C_2) = d(C) - \varepsilon(v) - 1$ . Поэтому из леммы 3 очевидным образом вытекает

**Лемма 4.** *Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ ,  $n \geq 3$ , будет разрушен по критерию  $\sigma_3(1, \varepsilon(v))$  при удалении внутренней вершины  $v \in V_C$  (т. е. когда эпицентром является внутренняя вершина  $v \in V_C$ ). Причем диаметры появившихся в результате структурного разрушения компонентов будут равны  $\varepsilon(v) - 1$  и  $d(C) - \varepsilon(v) - 1$ . ♦*

### 3.4. Структурное разрушение графов-цепей по критерию полного разрушения

Рассмотрим вопрос о разности начальной (текущей)  $w_0(v)$  и предельной загрузки  $\bar{w}(v)$  элементов графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$ .

Предположим, что эпицентром на графе-цепи  $C = (V_C, E_C)$  является одна из его внутренних вершин  $v^* \in V_C$ . Пусть также  $\bar{w}(v^*) - w_0(v^*) > \bar{w}(v^*)/2$ , тогда после удаления эпицентра  $v^* \in V_C$  текущая загрузка смежных ему вершин  $v', v'' \in V_C$  станет равной

$$\begin{aligned} \bar{w}_1(v') &= \bar{w}_1(v'') = w_0(v') + \bar{w}(v^*)/2 = \\ &= w_0(v^*) + \bar{w}(v^*)/2 < \bar{w}(v^*). \end{aligned}$$

Поэтому процесс структурного разрушения прекратится, а его длительность будет  $T_{cr} = 1$ .

В другом случае, когда  $\bar{w}(v^*) - w_0(v^*) \leq \bar{w}(v^*)/2$ , длительность процесса структурного разрушения  $T_{cr} > 1$ , если система не выйдет из строя при достижении установленного критерия разрушения.

Иная ситуация складывается, когда эпицентром является одна из висячих вершин  $v_1, v_2 \in V_C$  графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$ . В таком случае  $\bar{w}(v_1) - w_0(v_1) < \bar{w}(v_1)$ , поэтому для смежной эпицентру вершине  $v''' \in V_C$  будет справедливо выражение  $w_1(v''') = w_0(v''') + \bar{w}(v_1) > \bar{w}(v''')$ . А это значит, что вершина  $v''' \in V_C$  выйдет из строя (будет удалена) в следующий момент времени  $t = 2$ . Причем вершина  $v'''$  окажется висячей для цепи  $C/v_1$ , что при-

ведет к удалению смежной ей вершине в момент времени  $t = 3$ . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будут удалены все вершины графа-цепи  $C = (V_C, E_C)$ , т. е. будет достигнут критерий разрушения  $\sigma_0(1)$ . Из проделанных рассуждений вытекает

**Лемма 5.** *Всякий граф-цепь  $C = (V_C, E_C)$ ,  $|V_C| = n$ ,  $n \geq 3$ , будет разрушен по критерию  $\sigma_0(1)$  при удалении одной из висячих вершин за время  $T_{cr} = n$ . ♦*

## 4. СТРУКТУРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ

### 4.1. Структурное разрушение деревьев по критерию связности

У деревьев  $T = (V_T, E_T)$ , как и у графов-цепей  $C = (V_C, E_C)$ , центр может состоять либо из одной, либо из двух вершин. Если диаметральная цепь дерева  $T = (V_T, E_T)$  имеет четную длину, т. е. диаметр  $d(T)$  четный, то центр дерева состоит из одной вершины и из двух в противном случае, т. е. когда диаметр  $d(T)$  нечетный. У всякого дерева  $T = (V_T, E_T)$  не менее чем две висячие вершины. Все остальные, как в случае с графами-цепями, будем называть внутренними.

Поскольку всякое дерево утратит связность при удалении хотя бы одной невисячей (внутренней) вершины, то справедлива

**Лемма 6.** *Всякое дерево  $T = (V_T, E_T)$ ,  $|V_T| = n$ , будет разрушено по критерию  $\sigma_1(k)$ , где  $1 \leq k \leq n - n_T$ ,  $n_T$  — число висячих вершин, при удалении хотя бы одной внутренней вершины за время  $T_{cr} = 1$ . ♦*

### 4.2. Структурное разрушение деревьев по компонентному критерию

**Лемма 7.** *Всякое дерево  $T = (V_T, E_T)$ ,  $|V_T| = n$ , будет разрушено по критерию  $\sigma_2(1, t)$  при удалении одной внутренней вершины  $v \in V_T$  за время  $T_{cr} = 1$ , причем  $t = \deg(v)$ . ♦*

Доказательство. Удаление из дерева  $T = (V_T, E_T)$  хотя бы одной внутренней вершины приведет к распадению его на компоненты, причем число компонентов будет зависеть от степени удаляемой вершины. ♦

**Лемма 8.** *Всякое дерево  $T = (V_T, E_T)$ ,  $|V_T| = n$ , будет разрушено по критерию  $\sigma_2(k, t)$  при удалении  $k$  попарно несмежных внутренних вершин  $v_i \in V_T$  за время  $T_{cr} = 1$ , причем  $t = \sum_{i=1}^k (\deg(v_i) - 1) + 1$ . ♦*

Доказательство. Удаление из дерева  $T = (V_T, E_T)$  всех  $k$  внутренних вершин  $v_i \in V_T$  про-

ведем последовательно вопреки основным правилам, определяющим процесс структурного разрушения. Это позволит подсчитать число полученных в результате структурного разрушения компонентов, и никак не повлияет на общую картину их межэлементных связей.

После удаления первой вершины  $v_1 \in V_T$  дерево распадётся на  $\deg(v_1)$  компонентов. Поскольку эпицентры являются попарно несмежными и невисячими вершинами дерева  $T = (V_T, E_T)$ , то вершина  $v_2 \in V_T$ , принадлежащая какому-то из полученных при удалении вершины  $v_1$  компоненту также не будет являться для своего компонента висячей вершиной. Поэтому при удалении вершины  $v_2$  компонент, которому она принадлежит, распадётся на  $\deg(v_2)$  компонентов. А общее число компонентов, на которые распадётся само дерево  $T = (V_T, E_T)$ , после удаления вершин  $v_1$  и  $v_2$  станет равным

$$\begin{aligned} & \deg(v_1) + \deg(v_2) - 1 = \\ & = (\deg(v_1) - 1) + (\deg(v_2) - 1) + 1. \end{aligned}$$

И далее, каждое удаление одной из вершин  $v_i \in V_T, i = 3, 4, \dots, k$ , будет увеличивать число компонентов на  $\deg(v_i) - 1$ . А это значит, что при одновременном удалении всех эпицентров, соответствующих условиям леммы, дерево  $T = (V_T, E_T)$

распадётся на  $m = \sum_{i=1}^k (\deg(v_i) - 1) + 1$  компонен-

тов. Длительность процесса структурного разрушения составит  $T_{cr} = 1$ . ♦

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена теоретико-графовая модель разрушения сложных систем с ациклической структурой. Построенная простая модель не претендует на полноту описания процесса структурного разрушения систем, но позволяет выявить ряд важных топологических свойств и характеристик этого процесса.

Построенная модель в целом расширяет спектр дискретных математических моделей и область приложений теории графов. В соответствии с идеями структурной динамики на основе предложенной модели наравне с понятием клеточного автомата [6] целесообразно использование понятия *графового автомата*, что также расширяет описательные возможности теории графов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Управление риском* / В.А. Владимиров, В.В. Кульба, Г.Г. Малинецкий и др. — М.: Наука, 2000.
2. *Архипова Н.И., Кульба В.В.* Управление в чрезвычайных ситуациях. — М.: РГГУ, 1998.
3. *Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г.* Управление безопасностью и стойкостью сложных систем в условиях внешних воздействий // Проблемы управления. — 2005. — № 5. — С. 70–76.
4. *Лекции по теории графов* / В.А. Емеличев, О.И. Мельников, В.И. Сарванов, Р.И. Тышкевич. — М.: Наука, 1990.
5. *Форд Л., Фалкерсон Д.* Поток в сетях. — М.: Мир, 1966.
6. *Тоффоли Т., Марголюс Н.* Машины клеточных автоматов. — М.: Мир, 1991.

☎ (495) 250-79-71, e-mail: Azret\_Kochkarov@mail.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Г.Г. Малинецким. □

## Новые книги

- Алексеев В.Е.** Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. — М.: Бином, 2006. — 318 с.
- Иванов Г.Е.** Слабо выпуклые множества и функции. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 351 с.
- Камаев В.А.** Технологии программирования. — М.: Высшая школа, 2005. — 359 с.
- Квасов Б.И.** Методы изометрической аппроксимации сплайнами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 360 с.
- Климонтович Ю.Л.** Турбулентное движение и структура хаоса. — М.: URSS, 2007. — 323 с.
- Корис Р.** Справочник инженера-схемотехника. — М.: Техносфера, 2006. — 607 с.
- Левин Б.Р.** Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
- Ориентация и навигация подвижных объектов.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 422 с.
- Пантелеев А.В.** Спектральный метод анализа нелинейных стохастических систем управления. — М.: Вузовская книга, 2006. — 392 с.
- Разработка моделей и методов повышения эффективности управления некоммерческими организациями.** — М.: ИПУ, 2007. — 75 с.
- Шестаков А.А.** Обобщённый прямой метод Ляпунова для систем с распределёнными параметрами. — М.: URSS, 2007. — 318 с.
- Юрко В.А.** Введение в теорию обратных спектральных задач. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 384 с.
- Васильев А.Н.** Научные вычисления в Microsoft Excel. — М.: Диалектика, 2004. — 512 с.
- Гусев В.С.** Яндекс: эффективный поиск. Краткое руководство. — М.: Диалектика, 2007. — 224 с.
- Йордан Э.** Объектно ориентированный анализ и проектирование систем. — М.: Лори, 2007. — 264 с.



# ПСЕВДОСПЕКТРЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

А.С. Девятисильный, Д.Е. Кислов

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток*

Предложена технология численного анализа корректности математической постановки ряда задач, в основе которой лежит сформулированная и доказанная теорема о локализации спектральных портретов двух близких по норме линейных операторов. На примере задачи определения околостационарных орбит показана эффективность применения изложенного метода в спутниковой навигации.

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ и решение многих прикладных задач связаны с проблемой локализации собственных чисел линейных операторов внутри определенной области в условиях возмущений этих операторов в вычислительной среде. В зависимости от конкретной решаемой задачи в качестве интересующей области локализации могут выступать различные подмножества поля комплексных чисел.

В современных вычислительных средах, обладающих динамической точностью выполнения математических операций, решение такой задачи для конкретного оператора (невысокой размерности) не представляет существенных затруднений. Однако в случаях, когда этот оператор известен лишь приближенно, возникает вопрос о локализации спектра неизвестного оператора на основе известного его приближения, который и является объектом внимания настоящей работы.

В предлагаемой работе решается задача гарантированной локализации в заданной области спектрального портрета [1] линейного конечномерного оператора, известного с некоторой априорно определенной точностью. Конкретными примерами ситуаций, в которых требуется решение такого рода задачи, могут служить проблема численного исследования устойчивости непрерывных и дискретных линейных динамических систем (или анализ устойчивости нелинейных по первому приближению), численная проверка достаточных условий локального максимума (минимума) для экстремальных точек функций многих переменных, анализ разрешимости систем линейных алгебраических уравнений и др.

Далее в изложении будем придерживаться следующих обозначений. Под оператором  $F$  будем по-

нимать невозмущенный (неизвестный) оператор, в отношении псевдоспектра [2] (или спектрального портрета [1]) которого предстоит строить гарантирующие заключения;  $\tilde{F}$  — доступное для анализа приближение оператора  $F$ ;  $\Omega$  — область локализации псевдоспектра, для которой требуется установить, содержится ли в ней данный спектральный портрет оператора  $F$  или указать условия, при которых это возможно.

## 1. МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Общим подходом к исследованию поведения спектров линейных операторов при наличии возмущений является анализ их псевдоспектров [2], или, как предложил называть их С.К. Годунов, спектральных портретов операторов.

Напомним [1], что под спектральным портретом произвольного линейного оператора  $F$  понимается объединение всех множеств собственных значений оператора  $F + \Delta F$  при  $\|\Delta F\| \leq \varepsilon \|F\|$ , где норма  $\|\cdot\|$  ниже полагается спектральной операторной нормой (в связи с этим распространенным является также термин  $\varepsilon$ -спектр оператора).

В этом случае необходимым и достаточным условием того, что комплексное значение  $\lambda$  принадлежит  $\varepsilon$ -спектру ( $\lambda \in \Lambda_\varepsilon(F)$ ), является выполнение условия [1]:

$$\|(\lambda I - F)^{-1}\| \geq \frac{1}{\varepsilon \|F\|}, \quad \varepsilon > 0. \quad (1)$$

Уточним, что в случае, когда  $\lambda$  является собственным числом оператора  $F$ , согласно работе [1] принимается  $\|(\lambda I - F)^{-1}\| = \infty$ , что влечет включение  $\lambda$  в спектральный портрет оператора  $F$  при любом  $\varepsilon \geq 0$ .

Наряду с условием (1) рассмотрим следующую модель возмущений, описывающую соотношение операторов  $F$  и  $\tilde{F}$ :

$$\|F - \tilde{F}\| \leq \gamma \|F\| \leq \frac{\gamma}{1-\gamma} \|\tilde{F}\|, \quad 0 \leq \gamma < 1, \quad (2)$$

из которой получим вспомогательное неравенство:

$$\frac{1}{1+\gamma} \|\tilde{F}\| \leq \|F\| \leq \frac{1}{1-\gamma} \|\tilde{F}\|. \quad (3)$$

Дальнейшая интерпретация модели (2) приводит к теореме о вложенности псевдоспектров точного и возмущенного операторов, которая с достаточностью замыкает решение обсуждаемой проблемы в рамках изложенных формальных представлений.

**Теорема.** Пусть  $F$  и  $\tilde{F}$  соответственно точный и возмущенный операторы, удовлетворяющие неравенству (2). Тогда  $\varepsilon$ -спектр невозмущенного оператора  $F$  целиком содержится в  $\varepsilon$ -спектре оператора  $\tilde{F}$ , причем

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\gamma + \varepsilon}{1 - \gamma}. \quad (4)$$

**Доказательство.** Рассмотрим неравенство, являющееся следствием теоремы об устойчивости сингулярных чисел к возмущениям [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_j(\lambda I - \tilde{F}) - \frac{\gamma}{1-\gamma} \|\tilde{F}\| &\leq \sigma_j(\lambda I - F) \leq \\ &\leq \sigma_j(\lambda I - \tilde{F}) + \frac{\gamma}{1-\gamma} \|\tilde{F}\|, \quad j = \overline{1, n}, \end{aligned}$$

где  $\sigma_j(\cdot)$  —  $j$ -е сингулярное число линейного оператора в скобках. С учетом неравенств (1) и (3) получим следующее расширенное неравенство:

$$\begin{aligned} \frac{1-\gamma}{(1-\gamma)\sigma_{\min}(\lambda I - \tilde{F}) - \gamma\|\tilde{F}\|} &\geq \frac{1}{\sigma_{\min}(\lambda I - F)} \geq \\ &\geq \frac{1}{\varepsilon\|F\|} \geq \frac{1-\gamma}{\varepsilon\|\tilde{F}\|}, \end{aligned}$$

откуда после элементарных преобразований

$$\frac{1}{\sigma_{\min}(\lambda I - F)} \geq \frac{1-\gamma}{(\varepsilon + \gamma)\|\tilde{F}\|},$$

из чего и следует выражение (4). Теорема доказана. ♦

Сформулированная теорема позволяет решать задачи локализации спектральных портретов операторов, известных лишь с некоторой точностью, предопределяемой моделями рассматриваемого здесь типа (2).

Пусть для невозмущенного оператора  $F$  исследуется вопрос о локализации его спектра в заданной области  $\Omega$ . Тогда, в свете изложенного, может быть предложена следующая процедура решения

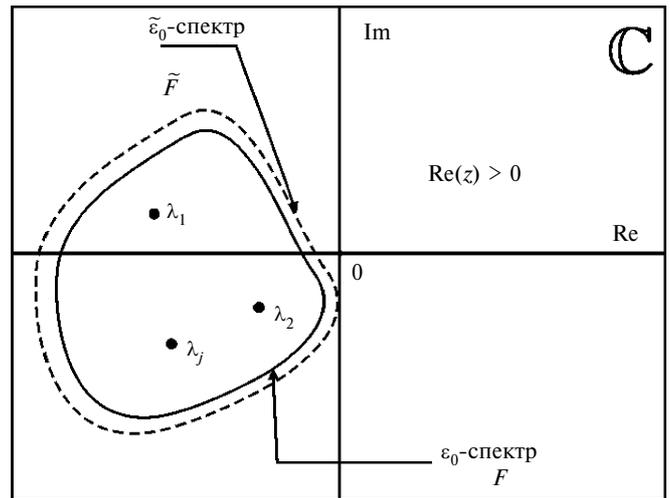


Рис. 1. Вложение псевдоспектров операторов  $F$  и  $\tilde{F}$

такой задачи. Обозначим  $\tilde{\varepsilon}_0$  — максимально допустимое значение относительных возмущений оператора  $\tilde{F}$ , при которых начинается выход его псевдоспектра из области  $\Omega$ . Если при текущих значениях  $\gamma$  и  $\tilde{\varepsilon}_0$  существует положительное значение  $\varepsilon_0$ , удовлетворяющее соотношению (4), то это означает вложенность  $\varepsilon_0$ -спектра оператора  $F$  в  $\tilde{\varepsilon}_0$ -спектр возмущенного оператора  $\tilde{F}$ , что в свою очередь влечет  $\Lambda_{\varepsilon_0}(F) \subseteq \Omega$  (рис. 1).

Таким образом, условие, гарантирующее существование вложенного псевдоспектра невозмущенного оператора, это наличие при заданных  $\gamma$  и  $\tilde{\varepsilon}_0$  положительного  $\varepsilon$ , удовлетворяющего соотношению (4).

Итогом сказанного является

**Следствие 1.** Если  $\tilde{\varepsilon}_0$ -спектр возмущенного оператора  $\tilde{F}$  целиком содержится в области  $\Omega$ , причем  $\exists P: P \in \partial\Lambda_{\tilde{\varepsilon}_0}(\tilde{F})$  и  $P \in \partial\Omega$  ( $\partial(\cdot)$  — символ границы области), то при

$$\gamma < \gamma^* = \frac{\tilde{\varepsilon}_0}{1 + \tilde{\varepsilon}_0}$$

существует ненулевой  $\varepsilon$ -спектр оператора  $F$ , целиком содержащийся в  $\tilde{\varepsilon}_0$ -спектре оператора  $\tilde{F}$ .

Заметим, что случай  $\gamma \geq \gamma^*$  исключает (в рамках изложенного) возможность гарантирующих заключений о принадлежности спектра оператора  $F$  заданной области  $\Omega$  и требует, вообще говоря, проведения дополнительного исследования.

Рассмотрим случаи конкретных областей  $\Omega$ , возникающих в реальных прикладных задачах.



*Исследование устойчивости.* При исследовании устойчивости линейных стационарных систем в качестве области  $\Omega$  выступает левая комплексная полуплоскость  $\Omega = \{z: \operatorname{Re}(z) \leq 0\}$ . В этом случае следствие 1 может быть переформулировано следующим образом:

*Следствие 1.1.* Для того, чтобы невозмущенный оператор  $F$  был устойчив, при условии, что спектр оператора  $\tilde{F}$  находится в области устойчивости, достаточно выполнения соотношения

$$\gamma < \gamma^* = \frac{\tilde{\varepsilon}_0}{1 + \tilde{\varepsilon}_0},$$

где  $\tilde{\varepsilon}_0 > 0$  такое, что  $\exists P \in \mathbb{C}: P \in \partial\Lambda_{\tilde{\varepsilon}_0}$  и  $\operatorname{Re}(P) = 0$ .

*Определение типа экстремума вещественной функции многих переменных.* При численном исследовании типа экстремальной точки функций многих переменных требуется установить знакоопределенность формы, задаваемой ее гессианом (обозначим его  $F$ ). При этом доступным для анализа является его — гессиана — вычисленный образ  $\tilde{F}$ . Такая ситуация, например, возможна, когда элементы матрицы  $F$  представляют собой сложные, требующие численной аппроксимации выражения. Для данной ситуации областью  $\Omega$  будет множество вида  $\Omega = \mathbb{C} \setminus \{z: \operatorname{Re}(z) = 0\}$ . Сохраняя смысл величины  $\tilde{\varepsilon}_0$ , приходим к следствию:

*Следствие 1.2.* Если при выполнении неравенства

$$\gamma < \gamma^* = \frac{\tilde{\varepsilon}_0}{1 + \tilde{\varepsilon}_0}$$

имеет место  $\Lambda_{\tilde{\varepsilon}_0} \subseteq \{z: \operatorname{Re}(z) \geq 0\}$  ( $\Lambda_{\tilde{\varepsilon}_0} \subseteq \{z: \operatorname{Re}(z) \leq 0\}$ ), то в исследуемой экстремальной точке функция имеет локальный минимум (максимум).

*Исследование разрешимости систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).* Известно, что исследование корректности математической постановки многих прикладных задач сводится к анализу разрешимости СЛАУ. Например, при анализе наблюдаемости (управляемости) линейных динамических систем требуется установить существование и единственность решения специально сформированной СЛАУ [3]. С другой стороны, вопрос об исследовании разрешимости систем линейных уравнений имеет и самостоятельный интерес. Напомним [1], что однозначное решение системы с квадратной матрицей существует тогда и только тогда, когда спектр этой матрицы не содержит нулевых значений. Откуда следует, что область  $\Omega$  должна включать в себя все точки множества  $\mathbb{C}$  за исключением начала координат. Соответствующая интерпретация исходного следствия 1 в этом случае примет вид:

*Следствие 1.3.* Для невырожденности исходной и возмущенной систем, заданных операторами  $F$  и  $\tilde{F}$  соответственно, достаточно выполнения соотношения

$$\gamma < \gamma^* = \frac{1}{1 + \mu(\tilde{F})},$$

где  $\mu(\tilde{F})$  — спектральное число обусловленности оператора  $\tilde{F}$ .

Для обоснования следствия 1.3 достаточно показать, что  $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{F}) = \mu^{-1}(\tilde{F})$ . Действительно, норма минимального возмущения оператора  $\tilde{F}$ , превращающего его в необратимый, есть  $\sigma_{\min}(\tilde{F})$  [1]. При таком возмущении, обозначим его  $\Delta\tilde{F}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_0$ -спектр касается начала координат. Следовательно,  $\|\Delta\tilde{F}\| = \tilde{\varepsilon}_0 \|\tilde{F}\| = \sigma_{\min}(\tilde{F})$ , откуда  $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{F}) = \mu^{-1}(\tilde{F})$ .

Отметим, что последнее следствие эквивалентно ранее сформулированным авторами условиям разрешимости задачи определения параметров спутниковых орбит [4] в соответствующих обозначениях цитируемой работы.

В заключение теоретического изложения рассмотрим более подробно вопрос об исследовании устойчивости стационарной линейной системы, динамика которой определяется оператором  $F$ .

В рамках модельных представлений (2) имеют место две задачи.

Первая: при известном операторе  $\tilde{F}$  сформулировать требования к параметру  $\gamma$ , гарантирующие устойчивость невозмущенного оператора  $F$ .

Вторая: по априорно известному значению  $\gamma$  оценить степень устойчивости невозмущенного оператора  $F$ , т. е. найти значение  $\varepsilon_0$ . Решение первой задачи с достаточностью раскрывает следствие 1.1.

Решение второй следует из соотношения (4):  $\varepsilon_0 = (1 - \gamma)\tilde{\varepsilon}_0 - \gamma$ . Величина  $\varepsilon_0$  — максимально допустимый порог относительных возмущений оператора  $F$ , с достаточностью при  $\varepsilon_0 > 0$  не выводящих его спектр из области устойчивости.

Далее рассматривается пример применения изложенной технологии анализа устойчивости для решения задачи определения спутниковых орбит.

## 2. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим задачу определения параметров орбиты квазистационарного искусственного спутника Земли по дальномерным измерениям с наземных пунктов наблюдения (НПН). Классическим подходом к решению таких нелинейных обратных

задач является метод, основанный на их сведении к линейным, для которых алгоритмы решения более просты в реализации. Одна из существенных особенностей задачи определения околостационарной орбиты состоит в возможности выбора в качестве опорной стационарной орбиты, что, в свою очередь, приводит к необходимости оценки параметров стационарной линейной системы типа «состояние—измерение». Реализация последней задачи (задачи оценки параметров соответствующей стационарной линейной системы) осуществляется с помощью алгоритма винеровской фильтрации [3].

Образ оператора фильтра  $F = A - KH$  ( $A$  — матрица динамической части системы;  $H$  — матрица наблюдения, а  $K$  — матрица передачи фильтра) в виртуальной среде аккумулирует в себе ошибки, накапливаемые в процессе его вычисления. Например, при нахождении матрицы передачи  $K$  требуется решение непрерывного алгебраического уравнения Риккати [3], которое для большинства прикладных задач может быть найдено лишь приближенно; кроме того, неточности, связанные с выполнением матричных операций на ЭВМ, также привносят свой вклад в суммарную вычислительную ошибку. Таким образом, точное уравнение, описывающее динамику фильтра при реализации алгоритма в вычислительной среде, заменяется возмущенным с оператором  $\tilde{F} = \tilde{A} - \tilde{K}\tilde{H}$ , где  $\tilde{K}$  — матрица передачи фильтра вычисленная на ЭВМ;  $\tilde{A}$  и  $\tilde{H}$  — образы матриц  $A$  и  $H$  в вычислительной среде.

Итак, в соответствии с представленной в § 1 теоремой необходимо найти значения  $\tilde{\varepsilon}_0$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon_0$  и  $\gamma^*$  и проверить гарантирующее условие  $\gamma < \gamma^*$ .

Значение  $\tilde{\varepsilon}_0$  вычисляется в соответствии с определением псевдоспектра матрицы  $\tilde{F}$ ; для вычисления  $\varepsilon_0$  предварительно требуется найти значение  $\gamma$ . С этой целью обратимся к концепции построения численно-аналитических оценок накапливаемых погрешностей [4], преимущество которых заключается в том, что вывод результирующей оценки не требует априорного знания норм точных (невозмущенных) матриц — все необходимые числовые значения вычисляются в процессе решения конкретной прикладной задачи. Учитывая структуру матрицы  $F$ , ее возмущения будут аккумулировать возмущения матриц  $D$ ,  $A$ ,  $H$  и  $R$  ( $R$  и  $D$  — ковариационные матрицы ошибок измерений и фильтрации, соответственно).

Запишем модели возмущений этих матриц:

$$\|H - \tilde{H}\|_F \leq \varepsilon_H \|H\|_F, \quad \|D - \tilde{D}\|_F \leq \varepsilon_D \|D\|_F,$$

$$\|A - \tilde{A}\|_F \leq \varepsilon_A \|A\|_F, \quad \|R^{-1} - \tilde{R}^{-1}\|_F \leq \varepsilon_R \|R^{-1}\|_F,$$

где возмущенные операторы отмечены «тильдой»;  $\|\cdot\|_F$  — фробениусова норма матрицы [1].

В соответствии с изложенным, представим матрицы  $\tilde{F}$  и  $\tilde{K}$  в следующем виде:

$$\tilde{F} = (\tilde{A} - (\tilde{K}\tilde{H})_c)_c,$$

$$\tilde{K} = ((\tilde{D}\tilde{H}^T)_c \tilde{R}^{-1})_c,$$

где  $(\cdot)_c$  — результат выполнения вычислений на компьютере.

Тогда, следуя представлениям, изложенным в работе [1], получаем оценки норм погрешностей соответствующих операторов:

$$\begin{aligned} \|F - \tilde{F}\|_F &\leq \|F - \tilde{F}\|_F \leq J_F, \\ J_F &= \frac{\varepsilon_H + m\varepsilon_1}{(1 - \varepsilon_H)\left(1 - \frac{m-1}{2}\varepsilon_1\right)} \|\tilde{K}\|_F \|\tilde{H}\|_F + J_K \|\tilde{H}\|_F + \\ &+ \frac{\varepsilon_A}{1 - \varepsilon_A} \|\tilde{A}\|_F + \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \|\tilde{F}\|_F, \quad (5) \\ \|K - \tilde{K}\|_F &\leq J_K, \\ J_K &= \\ &= \frac{\varepsilon_D + (n+m)\varepsilon_1 + \varepsilon_R + \varepsilon_H}{(1 - \varepsilon_H)(1 - \varepsilon_R)(1 - \varepsilon_D)\left(1 - \frac{n-1}{2}\varepsilon_1\right)\left(1 - \frac{m-1}{2}\varepsilon_1\right)} \times \\ &\times \|\tilde{D}\|_F \|\tilde{H}\|_F \|\tilde{R}^{-1}\|_F, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_1$  — относительная точность представления чисел в ЭВМ (например, при вычислениях с удвоенной точностью  $\varepsilon_1 = 2^{52} \approx 2,2 \cdot 10^{-16}$ , а  $m$  и  $n$  — размерности пространства параметров состояния системы и вектора измерений, соответственно).

В качестве оценки  $\gamma$ , с учетом оценки (5), можно принять следующее

$$\gamma = \frac{J_F}{\|\tilde{F}\|} \leq \frac{J_F}{\|\tilde{F}\| - J_F}.$$

Числовое значение параметра  $J_F$  находят в процессе решения конкретной задачи, вычисляя необходимые величины  $\|\tilde{D}\|_F$ ,  $\|\tilde{H}\|_F$ ,  $\|\tilde{R}^{-1}\|_F$ ,  $\|\tilde{A}\|_F$  на ЭВМ.

Будем рассматривать задачу определения параметров околостационарной орбиты по дальномерным измерениям от трех неподвижных наземных пунктов наблюдения. Расположение пунктов наблюдения характеризуется значениями долготы ( $\lambda$ ), широты ( $\varphi$ ) и радиуса ( $\rho \approx 6371$  км); координаты стационарной точки, около которой рассматривается орбитальное движение, взяты равными  $\lambda = \varphi = 0$ ,  $\rho = 42216$  км, а основные параметры имитируемой орбиты — эксцентриситет  $e = 10^{-4}$  и



**Характеристики устойчивости задачи определения орбит**

№	Координаты НПН, град.						$\tilde{\varepsilon}_0$	$\varepsilon_0$	$\gamma \cdot 10^{-8}$	$\gamma^*$
	$\lambda_1$	$\varphi_1$	$\lambda_2$	$\varphi_2$	$\lambda_3$	$\varphi_3$				
1	0,1	0	-0,1	0	0	0,1	$8,379 \cdot 10^{-6}$	$8,323 \cdot 10^{-6}$	5,6	$8,379 \cdot 10^{-6}$
2	0,5	0	-0,5	0	0	0,5	$4,339 \cdot 10^{-5}$	$4,334 \cdot 10^{-5}$	5,3	$4,339 \cdot 10^{-5}$
3	1	0	-1	0	0	1	$8,686 \cdot 10^{-5}$	$8,681 \cdot 10^{-5}$	5,4	$8,687 \cdot 10^{-5}$
4	5	0	-5	0	0	5	$4,333 \cdot 10^{-4}$	$4,332 \cdot 10^{-4}$	5,4	$4,334 \cdot 10^{-4}$
5	20	0	-20	0	0	20	$1,676 \cdot 10^{-3}$	$1,675 \cdot 10^{-3}$	5,4	$1,678 \cdot 10^{-3}$
6	10	10	-10	10	0	10	$2,282 \cdot 10^{-6}$	$2,222 \cdot 10^{-6}$	5,9	$2,282 \cdot 10^{-6}$
7	10	0	10	-10	10	10	$1,480 \cdot 10^{-5}$	$1,475 \cdot 10^{-5}$	5,5	$1,480 \cdot 10^{-5}$

наклонение  $i = 0,5^\circ$ ; матрицы интенсивностей ошибок измерений и возмущений в динамической части системы полагались равными  $R = \text{diag}(10^4, 10^4, 10^4) \text{ м}^2$  и  $Q = \text{diag}(10^{-4} \text{ м}^2, 10^{-4} \text{ м}^2, 10^{-4} \text{ м}^2, 10^{-7} \text{ м/с}^2, 10^{-7} \text{ м/с}^2, 10^{-7} \text{ м/с}^2)$ , соответственно; кроме того, принималось, что возмущения имеют только вычислительную природу, так что  $\varepsilon_A = \varepsilon_H = \varepsilon_R = \varepsilon_1 \approx 2,2 \cdot 10^{-16}$ ; причем  $\varepsilon_D$  оценивалось по ширине полосы колебаний численного (с удвоенной точностью) решения дифференциального уравнения Риккати при больших значениях времени.

Результаты численного эксперимента представлены в виде фрагмента псевдоспектра оператора  $\tilde{F}$  (рис. 2), соответствующего конфигурации № 1 наземных пунктов в таблице, и таблицы значений  $\tilde{\varepsilon}_0, \varepsilon_0, \gamma$  и  $\gamma^*$  при различных положениях НПН.

Анализ представленных в таблице результатов показывает, что устойчивость винеровского фильтра к возмущениям возрастает по мере увеличения угловых расстояний между НПН (наблюдается

увеличение отношения  $\gamma/\gamma^*$ ). Наиболее благоприятными при этом в целом являются ситуации, когда текущая конфигурация НПН образует максимальный телесный угол, что в свою очередь, вообще говоря, актуализирует самостоятельную проблему поиска оптимальной конфигурации НПН при заданных ограничениях на их географическое расположение, которая требует дополнительного исследования.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

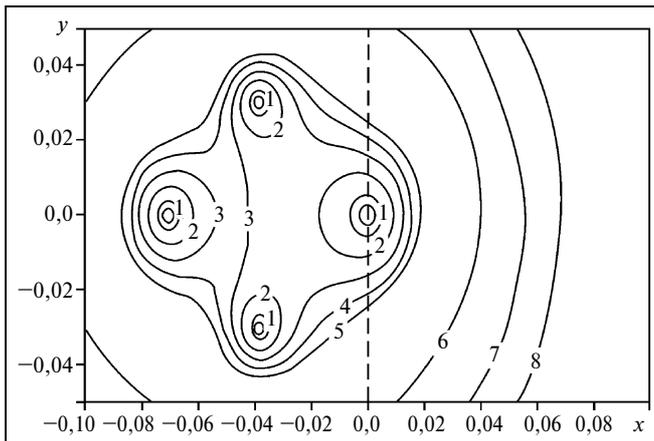
Представленный вычислительный эксперимент иллюстрирует целесообразность применения сформулированной теоремы для исследования устойчивости, что может быть актуальным при проектировании условий реализации как непрерывных, так и дискретных динамических систем. Кроме того, теорема позволяет решать задачи локализации спектров и (или) спектральных портретов операторов, для которых известно лишь их некоторое приближение. Последнее дает возможность применения изложенного подхода во всех теоретических и прикладных областях, в которых требуется решение задачи оценки близости расположения спектра к заданной границе.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Мальшев А.Н.* Введение в вычислительную линейную алгебру. — Новосибирск: Наука, 1991. — 229 с.
2. *Trefethen L.N.* Approximation theory and numerical linear algebra / In J.C. Mason and M.G. Cox, eds., Algorithms for Approximation, II (Shrivenham, 1988). — London: Chapman and Hall, 1990. — P. 336—360.
3. *Калман Р., Фалб П., Арбиб М.* Очерки по математической теории систем. — М.: Мир, 1971. — 400 с.
4. *Девятисильный А.С., Кислов Д.Е.* Исследование разрешимости задач определения спутниковых орбит по измерениям // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — С. 50—53.

☎ (4232) 31-35-49,  
e-mail: devyatits@mail.ru, kisl\_di@mail.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.Д. Земляковым. □



**Рис. 2. Типичный фрагмент спектрального портрета оператора  $\tilde{F}$ :**  
 1 —  $\tilde{\varepsilon} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ , 2 —  $\tilde{\varepsilon} = 3,0 \cdot 10^{-5}$ , 3 —  $\tilde{\varepsilon} = 5,0 \cdot 10^{-5}$ , 4 —  $\tilde{\varepsilon} = 7,0 \cdot 10^{-5}$ , 5 —  $\tilde{\varepsilon} = 9,0 \cdot 10^{-5}$ , 6 —  $\tilde{\varepsilon} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ , 7 —  $\tilde{\varepsilon} = 3,0 \cdot 10^{-4}$ , 8 —  $\tilde{\varepsilon} = 5,0 \cdot 10^{-4}$

# СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ТРИАД<sup>1</sup>

М.Б. Гузаиров, Б.Г. Ильясов, И.Б. Герасимова

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассмотрена целесообразность изучения сложных систем как упорядоченного множества элементарных систем в форме триад. Показано, что некоторые процессы, связанные с достижением цели или получением новых знаний можно представить в виде эвристической схемы последовательно связанных друг с другом триад.

## ВВЕДЕНИЕ

В системном анализе весьма актуальна задача структуризации сложных систем и процессов, их целей, функций, поведения и т. д. [1]. Исследователи стремятся к созданию некоторой обобщенной, универсальной комплексной методики решения этой задачи.

В данной статье также делается попытка решения подобного класса задач на основе построения некоторых эвристических схем, представляющих собой соединение триад как элементарных систем, отражающих определенную процедуру без ее детализации. Это вызвано стремлением получить некоторые инвариантные структуры, отражающие интеллектуальную деятельность в процессе познания.

## 1. АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТРИАД

При проведении системного анализа многие исследователи [1–3] пользуются понятием системы как целостного трехэлементного множества, не называя при этом ее триадой (тригоном, треугольником и т. д.). Другие же [4–6], наоборот, широко используют понятие триады, подчеркивая, что она есть элементарная открытая и целостная система, объединяющая три элемента (части, этапы и т. д.) в единое целое. Эта простейшая форма является одновременно и универсальной для представления системы. Все элементы триады равносильны, равноценны в том смысле, что без любого из них триада не существует. У триады как открытой системы сохраняются внешние связи (в пространстве и во

времени), чтобы, соединяясь с другими триадами, образовывать более сложные структуры.

Многие определения абстрактной системы  $S$  на теоретико-множественном уровне строятся именно в форме триад. Так, например, А. Холл и А.И. Уемов [6, 7] понятие абстрактной системы строят на следующей тройке элементов: «вещи (объекты) — связи (отношения) — свойства (атрибуты)». Л. фон Берталанфи [6, 7] определяет систему как триаду: «Совокупность элементов — Отношения — Среда». У Ю.А. Урманцева [6, 7] определение системы также основано на триаде:

$$S = \langle \Phi, H, L \rangle,$$

где  $\Phi$  — множество первичных (базовых) элементов (подсистем),  $H$  — множество отношений (связей) между ними,  $L$  — множество законов и правил, позволяющее строить различные композиции (структуры, организации) из базовых элементов множеств  $\Phi$  и  $H$ .

В некоторых определениях системы множество  $L$  исследователи заменяют на множество структур ( $Str$ ), которое обеспечивает организованность системы и является результатом действия оператора  $L$  на множествах  $\Phi$  и  $H$ . При этом под структурой системы понимается ее неизменная часть, состоящая из базовых элементов и связей между ними, образованных в результате выбранного способа декомпозиции системы и не зависящих от состояния системы и режимов ее функционирования. Отсюда следует, что при изучении сложной системы можно рассматривать несколько видов ее структур в зависимости от выбранных базовых элементов.

Конечно же, такая слишком упрощенная геометрическая интерпретация системы в виде треугольника, отражающая отношения между тремя системообразующими факторами, не могла удов-

<sup>1</sup> Статья публикуется в порядке обсуждения.

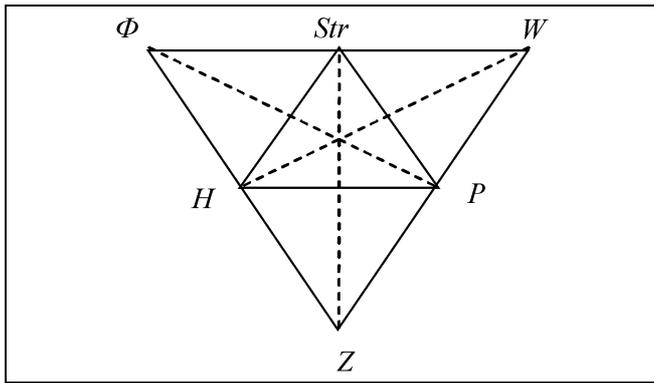


Рис. 1. Модель системы в форме триад

летворить исследователей и вызвала у многих из них объективные критические замечания. Со временем в определение системы стали добавлять новые системообразующие факторы [6, 7].

Например, рассмотрим понятие системы, основанное на шести системообразующих факторах:

$$S = \langle \Phi, H, Str, P, W, Z \rangle, \quad (1)$$

где  $P$  — множество параметров базовых элементов и связей между ними,  $W$  — интегративные свойства системы,  $Z$  — цели функционирования системы.

Систему (1) геометрически можно представить в виде соединения триад (рис. 1).

Общее число триад, содержащихся в данной системе, равно числу сочетаний из 6 по 3, т. е.

$C_6^3 = 20$ . Проанализируем полученные триады как элементарные системы. Рассмотрим некоторые из них.

Триада « $Str - \Phi - H$ » раскрывает механизм образования различных структур (композиций) из элементов множеств  $\Phi$  и  $H$ .

Триада « $Str - P - W$ » связана с формированием свойств системы на основе параметризации структуры, т. е. наделения элементов структуры определенными значениями параметров.

Триады « $Str - \Phi - Z$ », « $Str - H - Z$ », « $Str - P - Z$ » и « $Str - W - Z$ » раскрывают влияние как элементов структуры, так и самой структуры, а также ее параметров и свойств системы на формирование цели. В частности, заметим, что в общей теории систем известно положение, согласно которому поставленная цель может быть достигнута системой, имеющей вполне определенную структуру.

Триады « $Str - \Phi - W$ » и « $Str - H - W$ » позволяют активизировать влияние на формирование свойств системы как элементов структуры, так и самой структуры.

Триады « $W - Str - Z$ », « $W - P - Z$ », « $W - \Phi - Z$ » и « $W - H - Z$ » нацеливают на решение задачи согласования свойств системы и ее целей через структуру, параметры, связи и элементы.

Подобным образом анализируются и остальные триады в целях выявления тех элементарных системных задач, которые отражены этими триадами.

Далее система (1) может быть дополнена триадой развития системы:

$$S = \langle \Phi, H, Str, P, W, Z, C, R, F \rangle, \quad (2)$$

где  $C$  — множество стратегий развития (направления, технологии и алгоритмы самоорганизации, адаптации и т. д.),  $R$  — множество ресурсов, необходимых для развития,  $F$  — множество состояний внешней среды, ее влияние на систему.

Систему (2) также можно представить геометрически в виде соединения триад. Для этого в модель на рис. 1 необходимо вписать в треугольник с вершинами  $C, R, F$ . Теперь для исследования системы (2) необходимо проанализировать уже  $C_9^3 = 84$  триады, т. е. дополнительно 64 триады.

Очевидно, что анализ сложных систем связан с анализом большого числа взаимосвязанных триад. В работах [1, 7] рассмотрен ряд подходов к анализу сложных структур, состоящих из большого числа структурных элементов. Для уменьшения их числа при анализе структур можно, в частности, идти двумя путями. Первый связан с разбиением общего числа триад на отдельные классы по тому или иному критерию, зависящему от целей исследования, и с последующим анализом этих классов. Результаты анализа свойств этих классов дают ответ на отдельные поставленные системные вопросы.

Второй путь связан с последующей интеграцией триад в более сложные композиции (компоненты). Например, модель системы на рис. 1 может быть представлена в виде одной триады:

$$S = \langle Str(P), W, Z \rangle, \quad (3)$$

где  $Str(P)$  — параметризованная структура системы:

$$Str(P) = \langle Str, H(P), \Phi(P) \rangle,$$

где  $\Phi(P), H(P)$  — параметризованные характеристики базовых элементов и связей между ними.

Конечно, при таком описании часть триад исключается из рассмотрения, и их влияние на свойства системы и на цели ее функционирования исследуются косвенно через параметризованную структуру.

Далее с учетом триады (3) систему (2) можно представить следующим образом:

$$S = \langle Str(P), W, Z, C, R, F \rangle. \quad (4)$$

Теперь анализ системы (4), вместо системы (2), сводится уже к анализу только 20-ти триад.

Таким образом, анализ сложной системы сводится к анализу множества триад, образованных из системообразующих факторов, включенных в понятие данной системы. Каждая триада позволяет формировать простейшие системные задачи. Исследование сложной системы заключается именно в постановке и решении этих системных задач на основе

триад. Однако нельзя познать полностью сущность системы, изучив лишь отдельные триады, а необходимо изучать в комплексе все множество взаимосвязанных триад, принадлежащих данной системе.

В качестве примера применения данного подхода рассмотрим системную модель разработки и эксплуатации нефтяного месторождения, построенную на основе триад.

Известно, что возможность повышения эффективности нефтедобычи связана с решением ряда взаимосвязанных задач таких, как энергоснабжение, совершенствование нефтедобывающего оборудования, достижение высоких экономических и экологических показателей и др. Многообразие задач, требующих своего решения в рамках общей проблемы снижения всех видов затрат на единицу добытой нефти и повышения нефтеотдачи продуктивного пласта, вызывает необходимость интеграции научных знаний из различных областей науки и техники.

Такая интеграция может быть осуществлена на основе триад, объединяющих в единую систему объекты различной физической природы, влияющие на процесс добычи нефти [8]. К ним относятся не только объекты нефтедобычи, но и различные технологии, свойства и структура продуктивного пласта, свойства самой нефти.

На рис. 2 представлена полная системная модель разработки и эксплуатации месторождения нефти. Здесь через триаду, стороны которой обозначены  $\alpha_j$ ,  $\beta_k$ ,  $\gamma_j$  и т. д., условно характеризуют те закономерности, которым подчиняются отношения между элементами триад.

Отметим, что локальные триады, объединяясь, образуют единую глобальную триаду, стороны которой характеризуют такие отношения, как анализ свойств пласта и нефти, прогноз и синтез как целенаправленное формирование свойств пласта, а также управление как целенаправленное воздействие на продуктивный пласт. В структуре глобальной триады можно выделить отдельные слои (меридианы), которые характеризуются либо общностью объектов (как, например, технологии, свойства пласта и др.), либо общностью отношений (как, например, измерения, выбор режима и др.).

Вся глобальная триада замыкается через процесс управления, цель которого заключается в такой организации добычи нефти в целом, при которой достигается наибольшее (но не абсолютно максимальное) значение КИН. В работе [8] подробно анализируется каждая из триад.

Предложенная системная модель, по мнению специалистов, позволяет более глубоко и всесторонне описать историю разработки пласта и воссоздать текущее состояние месторождения в целом, а также максимально учесть возможные взаимосвязи различных факторов при долгосрочном и оперативном прогнозировании добычи нефти.

## 2. ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ К ЦЕЛИ В ВИДЕ ТРИАД

Покажем, что схему планирования действий человека, направленных на достижение цели, можно представить в виде системной модели, представляющей собой соединение триад. В основе всех этих триад лежит некоторая базовая (фундаментальная) триада: «Исходное (начальное) состояние — Технология (способ, алгоритм) перехода — Новое (конечное) состояние».

Предположим, что сформирована некоторая цель  $Z$ , полностью отражающая потребности человека. Пусть такой целью является выпуск некоторого количества продукции (например, автомобилей, двигателей, приборов и др.), удовлетворяющей определенным техническим требованиям и требованиям по качеству. Тогда процесс движения к цели  $Z$  можно разбить на ряд этапов, каждому из которых будет соответствовать своя триада (см. рис. 2).

*Этап 1.* Сформированная цель  $Z$  тем или иным способом декомпозируется на множество  $M_z$  подцелей, т. е. строится дерево целей. Дальнейшая конкретизация подцелей как в пространстве и во времени, так и в количественном и качественном отношениях позволяет сформировать множество  $Z$  задач. Таким образом, на первом этапе формируется триада «Цель — Подцели — Задачи».

*Этап 2.* Множество  $Z$  задач отображают на множество  $F$  функций, связанных с решением этих задач. Наиболее распространенные функции: проектирование; планирование; управление; организация; контроль; диагностика; прогнозирование; конструирование; производство; сбор, хранение и обработка информации; адаптация, обучение, развитие и др. Для каждой задачи определяется из множества  $A$  свой алгоритм ее решения в зависимости от того, в каком режиме выполняется функция (ручном, автоматическом, автоматизированном и др.). Желательно, чтобы алгоритм был оптимальным в смысле выбранного критерия (максимальной точности, быстродействия, ресурсосбережения и др.). Таким образом, на втором этапе формируется триада: «Задачи — Алгоритмы — Функции».

*Этап 3.* На этом этапе множество  $F$  выполняемых функций отображают на множество  $S$  функциональных систем, которые должны обеспечить надежное, точное, своевременное и качественное выполнение функций при заданных условиях функционирования. Для каждой системы следует из некоторого многообразия структур выбрать ту структуру, которая обеспечила бы эффективное функционирование системы. Параметризация множества  $S$  и приводит к конкретной модели реализации системы. Итак, сформирована триада: «Функции — Структуры — Системы».

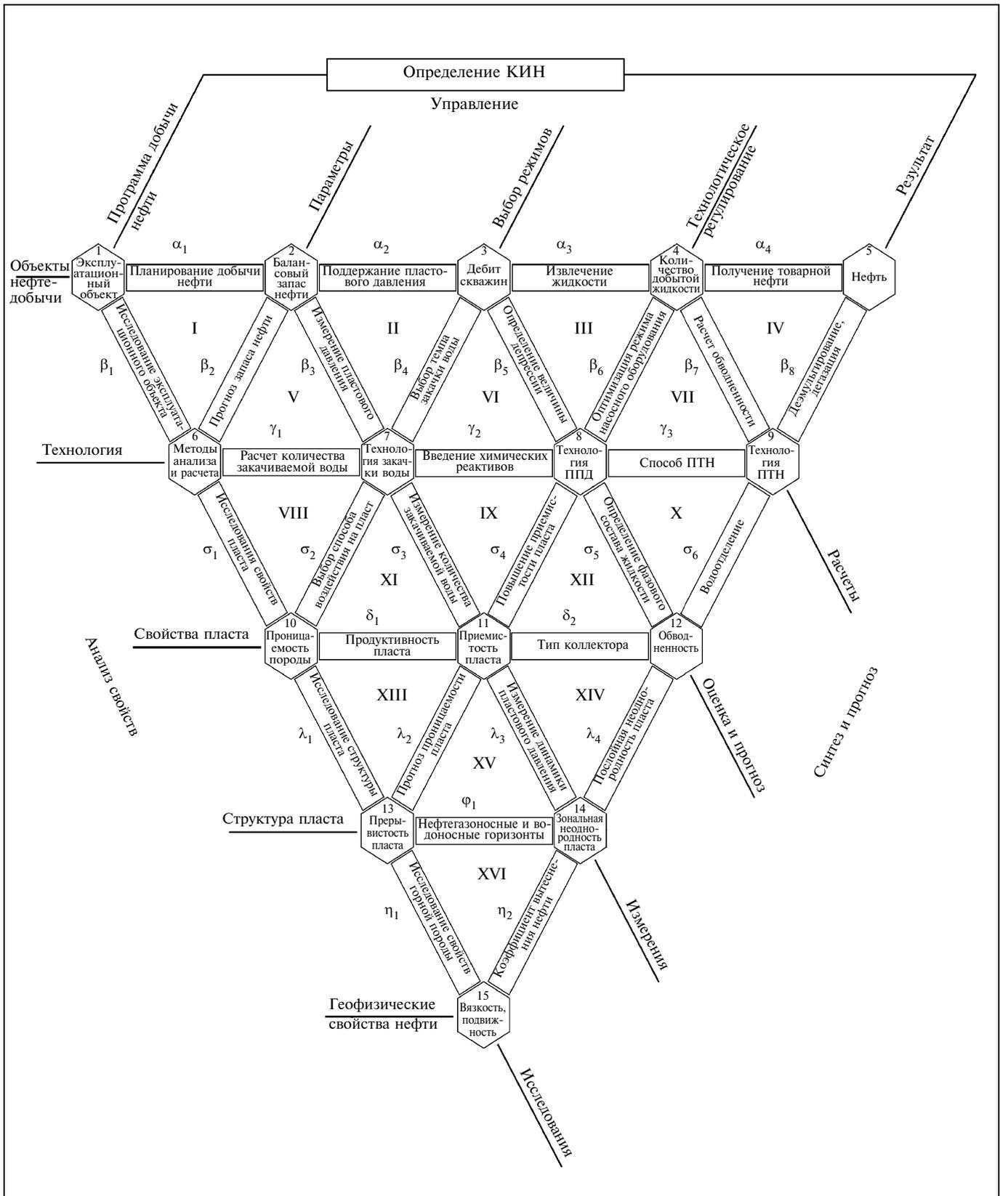


Рис. 2. Системная модель разработки и эксплуатации месторождения нефти:

КИН — коэффициент извлечения нефти; ПТН — производство товарной нефти; ППД — поддержка пластового давления

*Этап 4.* Далее множество  $S$  систем отображают на множество  $K$  конструкций (конфигураций, архитектур) этих систем. Здесь конструкция системы рассматривается как образ ее практической реализации. Многообразие способов конструирования, технических решений, структур системы порождает множество  $B_k$  вариантов конструкций. Из них для каждой системы выбирается такой вариант, который удовлетворял бы заданным критериям. Например, для систем автоматического управления техническими объектами это многообразие конструкций выражается в том, что система может быть реализована в одном из следующих классов: механических, электромеханических, электронных, гидромеханических, пневмомеханических и других систем. Таким образом, сформирована триада: «Системы — Варианты конструкций — Конструкции».

*Этап 5.* На этом этапе множество  $K$  конструкций отображают на множество  $\Pi_{II}$  производственных процессов. При этом множество  $K$  конструкций должно быть согласовано с множеством  $T_x$  технологий их изготовления в данном производстве. Этап заканчивается формированием триады: «Конструкция — Технология — Производство».

*Этап 6.* Далее множество  $\Pi_{II}$  производственных процессов порождает конечный результат — выпускаемую продукцию  $N_B$ . Однако производственные процессы не могут быть реализованы без множества  $R$  ресурсов: трудовых, топливно-энергетических, материальных, финансовых, технических, технологических, информационных и др. В результате формируется триада: «Производство — Ресурсы — Продукция».

*Этап 7.* На заключительном этапе производится оценка  $J$  соответствия полученной продукции  $N_B$  поставленной цели  $Z$  как в качественном, так и в количественном отношениях. Таким образом, формируется триада «Продукция — Оценки — Цель». В результате оценочного анализа продукции происходит возврат к первоначальной цели с пересмотром ее содержания, что приводит к повторению всего цикла достижения цели.

В итоге весь процесс достижения цели может быть представлен в виде соединения триад (рис. 3).

Отметим, что вершины триад также можно соединить друг с другом (штриховые линии на рис. 3), что приведет к образованию новых триад. При этом нижний уровень отображает технологию перехода от одного типа объекта к другому.

В каждой триаде приходится решать задачу выбора (принятия решения) в силу многообразия возможных вариантов решения. Критерии выбора должны быть адекватными оцениваемым характеристикам объектов.

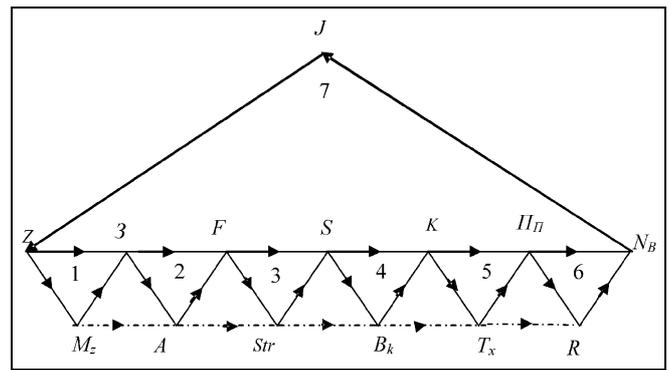


Рис. 3. Схема планирования достижения цели на основе триад

Таким образом, системная концепция достижения цели через построение триад как элементарных систем охватывает все важнейшие этапы организационных действий при достижении цели, объединяя их в единую систему. Данная схема в результате структурной связанности триад снижает организационную неопределенность в решении задач выбора различных вариантов при формировании промежуточных объектов. Кроме того, она исключает системные ошибки при проектировании процесса движения к цели. Совершенствование этого процесса кроется в совершенствовании и развитии каждой триады.

Данный подход применялся авторами в течение 10—15 лет для построения когнитивных и динамических моделей, в частности, для моделирования производственно-рыночных систем [9] и проектирования интеллектуальных систем управления производством [10].

Рассматриваемая концепция была реализована также при построении в форме триад общей модели цикла принятия решений при управлении летательным аппаратом в критических ситуациях в целях изменения ситуации от критической до безопасной [11]. Здесь каждая триада представляет собой элементарную модель системы знаний, реализация которой в управлении переводит объект из одного состояния в другое, доводя его до конечной цели — безопасного состояния.

В работе [12] рассмотрена системная модель проектирования систем автоматического управления силовой установкой летательного аппарата, представленная в форме триад. Данная модель объединяет все этапы проектирования системы в один процесс и позволяет исключить системные ошибки проектирования.

В работе [13] данный подход применяется для планирования процесса ликвидации чрезвычайных ситуаций. Объединяются в единую систему все виды деятельности человека, связанные с достижением цели в виде выполнения всех технологических работ по ликвидации чрезвычайной ситуации.



### 3. СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ТРИАД

Отметим, что некоторые исследователи (У.Р. Эшби [1, 7], Ю.И. Черняк [1, 7] и др.) включают в понятие системы и самого исследователя, ибо науку делают люди, а сам процесс получения новых знаний полностью формализовать не удастся. Однако, как будет показано ниже, можно составить на основе триад лишь некоторую схему формирования этого процесса. Назовем эту схему системной моделью процесса получения новых знаний в результате решения научно-прикладной проблемы. Выделим основные этапы этого процесса.

**Этап 1.** В первую триаду (рис. 4) включим исследователя (Ис) и его понимание научно-прикладной проблемы (НПП). При этом НПП трактуется как незнание, которое сводится к уточнению каких-либо научных положений, гипотез, законов, характеристик объектов, процессов, явлений и прочего как в качественном, так и в количественном отношении. Свое понимание НПП исследователь формирует на основе личного знания (ЛЗ), которое зависит от особенностей исследователя, его индивидуальности, интеллектуальной познавательной деятельности, творческих способностей. Таким образом, можно сформировать триаду «Ис — ЛЗ — НПП».

**Этап 2.** Формируется концепция (К) как некоторая научная парадигма, отражающая точку зрения исследователя на подход к решению НПП. Известно, что НПП решаются, как правило, в рамках научных традиций (НТр), носителями которых являются научные школы. Именно они оказывают влияние на формирование научной концепции. Следовательно, на этом этапе выделим триаду «НПП — НТр — К».

**Этап 3.** На основе разработанной концепции формируются общие задачи (З), которые являются результатом декомпозиции НПП. К ним могут быть отнесены управление, планирование, обработка информации, анализ устойчивости, адаптация, оптимизация и др. Процесс формирования задач идет на основе применения научных законов

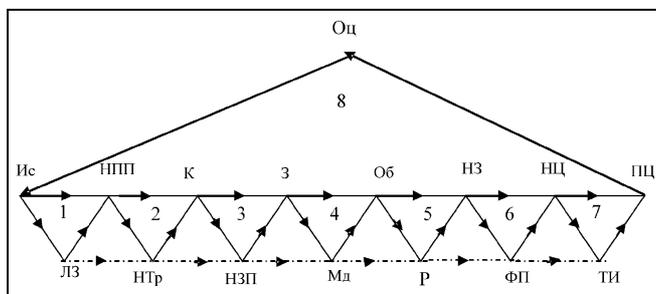


Рис. 4. Системная модель получения новых знаний

и принципов (НЗП) в рамках выбранной парадигмы. Здесь можно построить триаду «К — НЗП — З».

**Этап 4.** Решение задач связано с исследованием в некоторой предметной области конкретных объектов (Об), систем, процессов, явлений. Последние представляются в виде моделей (Мд), адекватно отражающие эти объекты исследования, их характеристики и свойства. Результатом этого этапа служит триада «З — Мд — Об».

**Этап 5.** Получение в данной предметной области новых научных знаний (НЗ) как уточнение некоторых научных положений, характеристик объектов и получение прочих сведений, т. е. как расширение наших знаний о чем-то известном как в качественном, так и в количественном отношении, происходит в результате затраты при исследовании некоторых ресурсов (Р) — методических, временных, финансовых, энергетических и др. Применяемые методы исследования во многом определяются как содержанием задач, так и принятыми моделями. Они выступают как методы научного познания и во многом определяют полученные научные результаты, которые являются носителями новых знаний. При этом сами методы и модели в процессе накопления знаний могут меняться.

Отметим, что процесс получения новых знаний на уровне открытий требует иной схемы представления этого процесса.

Итак, можно указать на следующую триаду: «Об — Р — НЗ».

**Этап 6.** Определяется научная ценность (НЦ) полученных знаний, которая может быть оценена по степени достоверности, истинности, непротиворечивости, нетавтологичности, по полноте и новизне. Но даже групповая экспертная оценка научной ценности полученных результатов, например, при защите диссертаций, научных проектов, не всегда дает правильный конечный результат. История науки знает множество случаев, когда некоторые выдающиеся результаты, сыгравшие впоследствии огромную роль в развитии науки, были в свое время не поняты, встречены научным миром агрессивно, а их авторы незаслуженно подвергались всякого рода гонениям. Отметим, что оценка научной ценности во многом зависит от формы представления (ФП) знаний, многообразие которых (в виде законов, правил, концепций, принципов, моделей, формул, теорем, схем, методов и т. д.) определяется многообразием областей научной деятельности и принятыми в них формами представления знаний, которые со временем могут меняться и корректироваться.

Таким образом, на этом этапе сформирована триада «НЗ — ФП — НЦ».

**Этап 7.** Оценивается практическая ценность (ПЦ) полученных знаний, которая определяется мерой их полезности в конкретных областях деятельности человека. Экспертная оценка практи-

ческой ценности знаний часто ориентируется на технологию использования (ТИ) научных знаний, которая может быть представлена, например, в виде методик расчета, графиков, таблиц, чертежей, информационных технологий и т. д. Чем шире технология использования знаний в различных предметных областях и чем выше ее эффективность, тем выше практическая ценность научных знаний.

Итак, на данном этапе сформулирована триада «НЦ — ТИ — ПЦ».

*Этап 8.* По научной и практической ценности полученных знаний производится оценка (Оц) полноты и правильности решения НПП с точки зрения самого исследователя, который определяет дальнейшие пути развития научных исследований, формирует новые цели и задачи. А это значит, что весь пройденный цикл получения новых знаний должен вновь повториться. И эта рефлексия наполнения и обогащения НПП новым содержанием будет происходить до тех пор, пока старая НПП не переродится или не сольется с новой, более сложной НПП. Замыкающей триадой является триада: «Научная и практическая ценность — Оценка решения НПП — Исследователь».

Свободные вершины триад системной модели получения новых знаний (см. штриховые линии на рис. 4) также могут быть соединены между собой, что приводит к образованию новых триад, которые способствуют более глубокому осмыслению процесса получения новых знаний.

Таким образом, представленная в форме триад системная модель циклического процесса получения новых знаний в результате решения научно-прикладной проблемы позволяет исследователю системно организовать свои научные исследования, а также осмыслить принятые концепции, применяемые методы и модели. Такая системная модель хранится в памяти исследователя как некоторая инвариантная схема (конструкция) до тех пор, пока не будут получены новые знания для ее коррекции [14].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем некоторые выводы.

Изучение системы на уровне отдельной триады не позволяет раскрыть полноту ее свойств и строения. Сложную систему можно изучать как упорядоченное множество триад (элементарных систем), принадлежащих данной системе.

Некоторые сложные процессы, связанные с достижением цели, проектированием или получением новых знаний, можно представить в виде эвристической схемы последовательно связанных друг с другом триад, отражающей все этапы организационных действий и объединяющей их в единую систему.

Абстрактность форм рассмотренных схем, охватывающих связи между элементами целого и не переходящих в детали, позволяет говорить об инвариантности этих форм.

Предложенный подход к построению схем из триад следует отнести к классу эвристических методов, основанных в большей степени на опыте, знаниях и интуиции исследователя, что не гарантирует возникновения ошибок, связанных с упущением некоторых деталей и неправильной интерпретацией отдельных факторов. Но в дальнейшем по мере накопления знаний в результате творческой деятельности исследователя эти схемы (модели) могут быть усовершенствованы, а грубые ошибки исправлены.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник. Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова.* — М.: Высшая школа, 2004. — 616 с.
2. *Прангишвили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
3. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ: учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1989. — 367 с.
4. *Баранцев Р.Г.* Синергетика в современном естествознании. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 144 с.
5. *Баранцев Р.Г.* Системная триада — структурная ячейка синтеза // Системные исследования. Ежегодник 1988. — М., 1989. — С. 193—210.
6. *Гранберг А.Г.* Основы региональной экономики: учебник для вузов. — М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2004. — 495 с.
7. *Волкова В.Н., Денисова А.А.* Основы теории систем и сложного анализа. Учебник для вузов. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 520 с.
8. *Дьячук И.А., Ильясов Б.Г., Шаньгин Е.С.* Системный подход к построению модели организации процесса разработки и эксплуатации нефтяного месторождения // Нефтепромысловое дело. — 2003. — № 5. — С. 16—22.
9. *Ильясов Б.Г., Исмаилова Л.А., Валеева Р.Г.* Моделирование производственно-рыночных систем. — Уфа: УГАТУ, 1995. — 321 с.
10. *Интеллектуальное управление производственными системами / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, Л.А. Исмаилова и др.* — М.: Машиностроение, 2001. — 327 с.
11. *Бадамшин Р.А., Ильясов Б.Г., Черняховская Л.Р.* Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний. — М.: Машиностроение, 2003. — 240 с.
12. *Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев и др.* — М.: Машиностроение, 1999. — 609 с.
13. *Бежаева О.Я.* Оперативное управление процессом ликвидации ЧС на основе динамических моделей: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. — Уфа: УГАТУ, 2004.
14. *Хокинс Дж., Блейкли С.* Об интеллекте. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. — 240 с.

☎ (3472) 73-78-35, e-mail: [ilyasov@tc.ugatu.ac.ru](mailto:ilyasov@tc.ugatu.ac.ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым. □

## ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

А.В. Кузнецов, А.С. Мандель, А.Б. Токмакова

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Исследована одна из моделей управляемых систем массового обслуживания. В качестве управляемого и динамически оптимизируемого параметра выступает число рабочих устройств обслуживания в многолинейной системе массового обслуживания, которое выбирается как функция от изменяющейся по времени интенсивности входящего потока требований. Процесс изменения во времени интенсивности входящего потока является дискретной по времени цепью Маркова с конечным числом состояний.

### ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемая модель управляемой системы массового обслуживания (СМО) с переменным и выбираемым в динамике числом рабочих устройств обслуживания широко применяется в сфере анализа деятельности таких социально-экономических объектов, как системы продажи различного рода билетов, бронирования мест в гостиницах, а также торгово-производственные, транспортные и многие другие системы.

Для решения подобных задач необходимо располагать достаточно точной моделью управляемой системы, которая строится с помощью классических методов теории массового обслуживания [1, 2], и адекватным аппаратом решения соответствующих задач дискретной по времени оптимизации. Значительный вклад в создание инструмента решения подобных задач принадлежит Ричарду Беллману, который в конце 1950-х — начале 1960-х гг. предложил аппарат дискретного динамического программирования [3]. Основное достоинство моделей динамического программирования заключается в том, что во многих случаях они позволяют получать серьезные аналитические результаты относительно оптимальных управлений. Одним из примеров подобных результатов служит установление факта оптимальности двухуровневых стратегий управления запасами [4]. Применительно к марковским моделям систем метод Беллмана был

исследован и развит Р. Ховардом [5], который назвал рассмотренный в его работах класс моделей (и соответствующие алгоритмы) марковскими процессами с доходами.

Интерес к управляемым СМО возникает в 1970-е гг. В связи с этим отметим фундаментальную работу В.В. Рыкова [6], в которой была приведена достаточно общая постановка задачи управления системами массового обслуживания и предложены подходы к ее решению. Было отмечено, что управлять в СМО можно дисциплиной обслуживания требований, выбором их структуры, воздействиями на входящий поток требований, изменением интенсивности обслуживания требований и рядом других параметров. Оригинальным вкладом в исследование возможности постановки и решения задачи управления так называемыми конфликтными СМО (т. е. системами, которые описываются моделями теоретико-игрового типа) стала работа Ю.И. Неймарка [7].

К концу 1980-х гг. интерес к управляемым СМО заметно возрос в связи с широким распространением принципиально нового класса прикладных систем, которые можно было интерпретировать и анализировать как системы массового обслуживания. Этим классом стали вычислительные и информационные компьютерные сети. Именно поэтому усилия специалистов в области теории массового обслуживания оказались направлены на разработку специфических моделей

(в том числе и сетевых) массового обслуживания, рассчитанных на применение к указанному классу прикладных систем. Особо отметим вклад теоретиков, представляющих школы В.М. Вишневого и В.А. Каштанова [8, 9].

Таким образом, в достаточно продолжительном интервале времени, который исчисляется примерно 20 годами (с 1985 по 2005 г.), практически вне зоны внимания большинства специалистов по теории массового обслуживания оставались такие модели управляемых СМО, которые были бы пригодны для описания, анализа и оптимизации функционирования объектов социально-экономической природы, к числу которых можно относить различные системы продажи билетов, системы бронирования мест в гостиницах, торгово-закупочные, транспортные и другие системы. Специфика объектов социально-экономической природы заключается, прежде всего, в том, что при их описании значительную роль играет эконометрический анализ их функционирования, выражающийся в тщательном и корректном учете всех экономических показателей, которые необходимо принимать во внимание при оценке качества функционирования таких объектов.

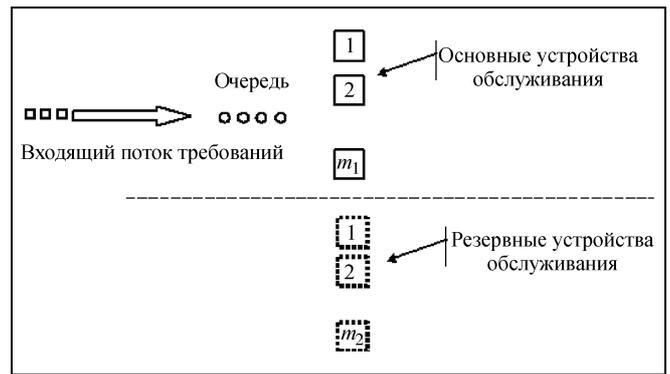
В настоящей статье рассматривается пример формирования многокомпонентного функционала экономической эффективности многолинейной СМО. С применением построенного функционала сформулирована и решена задача оптимизации функционирования рассматриваемой СМО.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим многолинейную СМО с набором подключаемых резервных устройств обслуживания, схематично представленную на рисунке.

Интенсивность  $\lambda$  входящего потока в фиксированные моменты времени  $t_n = n\tau$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , претерпевает скачкообразные изменения от  $\lambda_i$  к  $\lambda_j$  с вероятностями  $p_{ij}(m_1)$ <sup>1</sup>,  $i, j = 1, 2, \dots, L$  (в принципе возможен случай, когда переходные вероятности зависят также и от  $n$ , тогда вместо  $p_{ij}(m_1)$  следует писать  $p_{ij}(m_1, n)$ ). Таким образом, в каждом из интервалов длительности  $\tau$  интенсивность входящего потока требований постоянна и описывается

<sup>1</sup> Введение зависимости вероятностей скачков интенсивности входящего потока от числа рабочих устройств  $m_1$  связано с необходимостью учета эффекта влияния качества процесса обслуживания (в данном случае обусловленного временем ожидания клиентами начала обслуживания) на потребительский спрос, который и описывает интенсивность входящего потока.



Структура управляемой системы массового обслуживания

моделью случайной величины, принимающей значения из конечного множества  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L\}$  (считаем, что  $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_L$ ). Будем также считать, что  $M\mu > \lambda_L$ , где  $\mu$  — это интенсивность обслуживания на одном основном (рабочем) устройстве, а  $M = m_1 + m_2$  (в обозначениях рисунка).

В моменты времени  $t_n$  имеется возможность переводить устройства обслуживания из числа резервных в основные и обратно, т. е. осуществлять переключения резервных устройств в основные (включение) или обратные переключения: из основных — в резервные (отключение). Рассматриваемая модель массового обслуживания по своей идее весьма близка к предложенной в 60-е гг. прошлого столетия модели надежности, получившей название динамического резервирования [10, 11], хотя, как станет ясно из раздела 2 настоящей статьи, ее алгоритмическое решение качественно гораздо ближе к схеме двухуровневых стратегий управления запасами [4].

Будем рассматривать случай стационарных режимов в системе массового обслуживания, т. е. случай, когда в каждом из интервалов длительности  $\tau$  успевает поступить (и пройти обслуживание) такое число требований, которое достаточно велико для того, чтобы в рассматриваемой СМО на каждом шаге устанавливался стационарный в вероятностном смысле режим функционирования. Практически для этого достаточно, чтобы

$$\mu\tau \gg 1. \quad (1)$$

Разумеется, в этом случае справедливо и  $\lambda\tau \gg 1$ .

Предположение стационарности накладывает достаточно жесткое ограничение на рассматриваемую модель.

Прежде всего, должны быть выполнены соотношения  $\rho_i = \lambda_i / \mu M < 1$ ,  $\forall \lambda_i \in \Lambda$ . Таким образом,



система может устойчиво работать только с таким потоком, для которого выполнено условие

$$\lambda_i < \mu M, \quad \forall \lambda_i \in \Lambda. \quad (2)$$

Пусть  $\lambda_{\max}$  — максимальный элемент множества  $\Lambda$  (фактически, это значение  $\lambda_L$ ). Тогда неравенство (2) можно переписать в виде

$$\lambda_{\max} < \mu M. \quad (3)$$

Далее, на каждом шаге существует нижняя граница допустимого числа рабочих устройств  $m_{1p}^{(i)}$ , на которое можно переводить систему с расчетом на ее устойчивое функционирование (в смысле существования стационарного режима), и эта граница зависит от номера состояния  $i$  на соответствующем шаге.

Действительно, в состоянии  $i$  (по значению интенсивности входящего потока) должно выполняться условие стационарности  $\rho_i = \lambda_i / \mu m_{1p}^{(i)} < 1$ , откуда получаем

$$m_{1p}^{(i)} > \frac{\lambda_i}{\mu} \Rightarrow \underline{m}_{1p}^{(i)} = \frac{\lambda_i}{\mu} + 1, \quad \forall i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Таким образом, число работающих в состоянии  $i$  устройств может принимать значения от  $\underline{m}_{1p}^{(i)}$  до  $M$ .

Зададим компоненты затрат.

Пусть

$c_1$  — стоимость эксплуатации одного основного (рабочего) устройства обслуживания в единицу времени;

$c_2$  — стоимость содержания одного резервного устройства обслуживания в единицу времени (естественно, что  $c_1 > c_2$ , нередко  $c_2 = 0$ );

$A_1$  — цена переключения одного устройства из числа резервных в число основных (цена «включения»);

$A_2$  — цена переключения одного устройства из числа основных в число резервных (цена «отключения»);

$d$  — стоимость единицы времени пребывания одного требования в очереди на обслуживание;

$h$  — доход, связанный с окончанием обслуживания одного требования.

## 2. АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Обозначим через  $C^{(1)}(\lambda_i, m_1, m_{1p})$  среднее значение прибыли на одном шаге (длительности  $\tau$ ),

если в начале шага устанавливается значение интенсивности входящего потока, равное  $\lambda_i$ ; число основных (рабочих) устройств, с которыми СМО подходит к этому шагу, равно  $m_1$ ; и принимается управляющее решение о введении в действие момент начала шага  $m_{1p}$  основных устройств. Это означает сохранение прежнего числа работающих устройств обслуживания, если  $m_1 = m_{1p}$ ; необходимость отключения  $(m_1 - m_{1p})$  устройств, если  $m_1 - m_{1p} > 0$ ; и необходимость включения  $(m_{1p} - m_1)$  устройств, если  $m_1 - m_{1p} < 0$ .

Очевидно, что

$C^{(1)}(\lambda_i, m_1, m_{1p})$  — средний доход за один шаг — средние одношаговые затраты.

Из предположения о стационарности следует, что выполняются все входящие требования, а значит, в любом случае средний доход за один шаг составляет  $h\lambda_i$ .

Средние затраты складываются из затрат на включение резервных (отключение основных) устройств; затрат, связанных с пребыванием требований в очереди; и затрат на эксплуатацию основных и резервных устройств.

Затраты на включение (отключение)

$$\begin{aligned} Z_{\text{переключения}}(m_1, m_{1p}) &= \\ &= \begin{cases} A_1(m_{1p} - m_1), & \text{если } m_{1p} - m_1 > 0, \\ 0, & \text{если } m_{1p} = m_1, \\ A_2(m_1 - m_{1p}), & \text{если } m_{1p} - m_1 < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Затраты, связанные с пребыванием требований в очереди на шаге длительности  $\tau$ ,

$$\begin{aligned} Z_{\text{на очередь}} &= E \int_0^{\tau} dk(t, m_{1p}, \lambda_i) dt = d \int_0^{\tau} Ek(m_{1p}, \lambda_i) dt = \\ &= d\bar{k}(m_{1p}, \lambda_i)\tau, \end{aligned}$$

где  $E$  — символ оператора математического ожидания,  $k(t, m_{1p}, \lambda_i)$  — число требований в очереди к СМО с параметрами  $m_{1p}$  и  $\lambda_i$  в момент времени  $t$ , а  $\bar{k}(m_{1p}, \lambda_i)$  — средняя длина очереди в СМО с параметрами  $m_{1p}$  и  $\lambda_i$ . Интегрирование в силу предположения о стационарности ведется не в текущем интервале  $[t_n, t_{n+1}]$ , а в интервале  $[0, \tau]$ . Для стационарного случая имеем [1]:

$$\bar{k}(m_{1p}, \lambda_i) = \pi_0 \frac{(m_{1p} \rho_i)^{m_{1p}} \rho_i}{m_{1p}! (1 - \rho_i)^2},$$

где  $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu m_{1p}}$ , а  $\pi_0 = \left[ \sum_{i=0}^{m_{1p}} \frac{(m_{1p} \rho_i)^i}{i!} + \frac{(m_{1p} \rho_i)^{m_{1p}}}{m_{1p}!(1-\rho_i)} \right]^{-1}$  —

стационарная вероятность того, что в системе нет требований.

Параметр  $d$  характеризует косвенные издержки рассматриваемой СМО, связанные с тем, что увеличение длительности времени пребывания требований в очереди снижает предпочтения по обращению в данную СМО клиентов с требованиями на обслуживание. Можно построить математическую модель, которая связывала бы уровень утраты предпочтений со средним временем пребывания требований в очереди в случае его увеличения, и на основе этой модели сформировать обоснованную оценку значения коэффициента  $d$ . В настоящей работе задача построения подобной модели не рассматривается. Ограничимся замечанием, что в большинстве случаев значение параметра  $d$  на 1–2 порядка меньше значения введенного выше параметра  $h$ .

Затраты на эксплуатацию основных и резервных устройств за один шаг составляют:

$$Z_{\text{эксплуатации}}(m_{1p}) = c_1 m_{1p} + c_2 (M - m_{1p}).$$

Таким образом, средняя чистая прибыль за шаг составит:

$$C^{(1)}(\lambda_i, m_1, m_{1p}) = h\lambda_i - Z_{\text{переключения}} - Z_{\text{на очередь}} - Z_{\text{эксплуатации}}.$$

Пусть  $\Pi_s^*(\lambda_i, m_1)$  — максимальное значение средней прибыли на интервале, который начинается за  $s$  шагов до конца периода планирования  $[0, T]$ ,  $s + n = N$ , при значении  $\lambda_i$  интенсивности входящего потока и  $m_1$  включенных (до принятия управляющего решения о включении  $m_{1p}$  устройств) основных устройствах. Ниже выводятся уравнения динамического программирования для функционала  $\Pi_s^*(\lambda_i, m_1)$  с учетом условия (4).

Очевидно, что за один шаг до конца периода планирования при случайном значении интенсивности входящего потока  $\lambda_i$  значение введенного выше функционала  $\Pi_s^*(\lambda_i, m_1)$  запишется как

$$\Pi_1^*(\lambda_i, m_1) = \max_{m_{1p}^{(i)} \leq m_{1p} \leq M} C^{(1)}(\lambda_i, m_1, m_{1p}), \quad (5)$$

где  $\lambda_i \in \Lambda$ .

За  $s$  шагов до конца периода планирования имеем:

$$\Pi_s^*(\lambda_i, m_1) = \max_{m_{1p}^{(i)} \leq m_{1p} \leq M} \left\{ C^{(1)}(\lambda_i, m_1, m_{1p}) + \sum_{j=1}^L p_{ij}(m_{1p}) \Pi_{s-1}^*(\lambda_j, m_{1p}) \right\}, \quad (6)$$

где  $\forall s = \overline{2, N-1}$ ,  $\lambda_i, \lambda_j \in \Lambda$  — значения интенсивностей входящего потока в моменты времени за  $s$  и за  $s-1$  шагов до конца периода планирования соответственно.

Уравнения (5) и (6) используются для расчета программы оптимального управления  $m_{1p}^*(i, s)$ , где  $1 \leq s \leq N-1$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ .

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Следует признать, что при случайном характере входящего потока требований построение долгосрочных стратегий управления вряд ли окажется достаточно эффективным. Исходя из этого, разумно рассматривать такие значения  $N$ , которые отвечают реальным длительностям периода планирования. В зависимости от прикладной задачи это могут быть сутки, неделя, месяц или, самое большее, квартал.

Также естественно предполагать, что число устройств обслуживания в рассматриваемой СМО достаточно велико для того, чтобы удавалось обслужить все входящие требования. При этом в прикладном плане следует считать, что издержки содержания одного резервного устройства обслуживания достаточно малы по сравнению с издержками содержания рабочего устройства. Иначе говоря, полагается, что  $c_2 \ll c_1$ .

Предположение о стационарности потока на каждом временном интервале накладывает серьезные ограничения на допустимое множество значений переменных и заметно сужает область перебора (неравенства (3), (4)). Отметим дополнительно, что в отдельных случаях указанное условие может оказаться настолько действенным, что выстроенная в результате программа оптимального управления будет в значительной степени определяться именно этим условием, а не процедурой максимизации целевой функции. Иначе говоря, набор решений будет почти однозначно определяться вектором  $m_{1p}^{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ .



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и исследована новая модель управления многолинейной системой массового обслуживания, с помощью которой можно анализировать и оптимизировать функционирование объектов социально-экономической природы различных классов: систем продажи и бронирования билетов и мест в гостиницах, торгово-закупочных систем, систем общественного транспорта, биллинговых систем и ряда других.

Выписан и покомпонентно проанализирован функционал эффективности функционирования рассматриваемой многолинейной СМО. На основе проведенного анализа построена модель выбора оптимальных решений. Обсуждаются возможности практического использования предложенной модели и ограничения на ее применения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. — М.: Наука, 1966.
2. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения — М.: Сов. радио, 1971.
3. Беллман Р. Динамическое программирование. — М.: ИИЛ, 1960. — 400 с.
4. Хедли Дж., Уайтин Т. Анализ систем управления запасами. — М.: Наука, 1969. — 512 с.
5. Ховард Р.А. Динамическое программирование и марковские процессы. — М.: Сов. радио. 1984. — 190 с.
6. Рыков В.В. Управляемые системы массового обслуживания // Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. — 1975. — Т. 12. — С. 43—153.
7. Неймарк Ю.И. Динамические системы и управляемые процессы. — М.: Наука, 1978.
8. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. — М.: Техносфера, 2003.
9. Захаров П.П. Разработка автоматизированного программного комплекса для исследования качества и эффективности функционирования моделей технических систем и управляемых систем массового обслуживания: Дис. канд. техн. наук. — М.: МГИЭМ, 2006.
10. Райкин А.Л. Элементы теории надежности для проектирования технических систем. — М.: Сов. радио, 1967. — 256 с.
11. Мандель А.С., Райкин А.Л. Формирование оптимального плана включения запасных элементов / Автоматика и телемеханика. — 1967. — № 5. — С. 55—63.

☎ (495) 334-89-69, e-mail: [manfoon@ipu.ru](mailto:manfoon@ipu.ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Т. Алескеровым. □

## Уважаемые коллеги!

С 28 по 31 января 2008 г. состоится VII Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'08, которую проводят Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Российский Национальный комитет по автоматическому управлению, Отделением энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской Академии наук. Заседания будут проходить в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная, 65.

### Тематика конференции

- Общие методологии моделирования, идентификации, управления и программирования
- Математические задачи теории управления
- Системы управления с идентификатором
- Параметрическая идентификация
- Непараметрическая идентификация
- Структурная идентификация и разведочный анализ данных
- Идентификация и исследование моделей процессов выбора и принятия решений
- Идентификация организационных систем
- Методы и процедуры получения и анализа экспертных оценок
- Нейронные сети и проблемы идентификации
- Теория нечетких множеств и проблемы идентификации
- Идентификация систем для целей диагностики
- Моделирование систем
- Имитационное моделирование
- Методическое и программное обеспечение идентификации и моделирования
- Верификация и проблемы качества программного обеспечения сложных систем
- Глобальные сетевые ресурсы поддержки процессов идентификации, управления и моделирования
- Методики обучения методологии и технологии идентификации
- Научно-библиографические исследования
- Когнитивные аспекты идентификации

# УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

В.Ю. Столбов, М.Б. Гитман, С.А. Федосеев

Пермский государственный технический университет

Предложен принцип устойчивости иерархической многоуровневой модели управления сложной производственной системой. Сформулированы достаточные условия устойчивости по Адамару, с помощью которых определяются число необходимых структурных уровней и степень неопределенности модели на каждом уровне. Дано сравнение современных систем производственного планирования и управления JIT и MRP.

## ВВЕДЕНИЕ

При математическом моделировании сложных производственных систем и процессов широко применяется структурный подход, заключающийся в построении нескольких связанных между собой моделей на различных структурных уровнях [1, 2]. Однако, как отмечено в работе [3], отдельные подсистемы обычно настолько сильно взаимосвязаны между собой множеством прямых и обратных связей, что изменение одной из них может повлечь за собой значительные изменения в других частях системы и потере ее устойчивости. Поэтому возникает проблема обоснования необходимого числа уровней декомпозиции и установления связей между ними, при которых структурная модель была бы устойчивой по Ж. Адамару [4]. В этом случае важную роль играет количественная информация, получаемая на каждом структурном уровне системы управления, и степень ее неопределенности [5].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Пусть задана  $n$ -уровневая структурная веерная модель управления некоторой производственной системой, и на каждом уровне связь между входными и выходными параметрами задана с помощью некоторого оператора  $F$ , определенного с точностью до конечного числа неопределенных параметров:

$$J_i = F_i(x_i, y_i), \quad i = \overline{1, n},$$

где  $J_i$  — вектор выходных параметров на  $i$ -м уровне;  $x_i$  — вектор входных параметров на  $i$ -м уровне,

включая и параметры управления;  $y_i$  — вектор неопределенных параметров на  $i$ -м уровне размерности  $m_i$ .

Таким образом, полагается, что степень неопределенности системы на каждом структурном уровне определяется некоторой мерой  $m(y_i)$ , зависящей от числа и типа неопределенных параметров. Отметим, что при моделировании производственных систем и процессов оператор  $F$  обычно представляет собой систему нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений, а вектор  $y$  связан с отсутствием полной информации о предыстории процесса, а также с внешним влиянием окружающей среды. Эти параметры обычно входят в краевые условия задачи управления и носят случайный характер. Кроме этого, вектор  $y$  может содержать неопределенные параметры, связанные с незнанием свойств самой системы и невозможностью их определения из прямых экспериментов. В последнем случае эти параметры называются внутренними переменными или параметрами порядка системы и возникает необходимость построения моделей на более мелких масштабных уровнях для их описания. Будем считать, что связь между уровнями модели задается следующими соотношениями

$$y_i = f_i(x_j, y_j), \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $f_i$  — заданные агрегирующие операторы  $i$ -го уровня.

Следуя системному подходу [6], можно считать, что неопределенные параметры на  $i$ -м уровне зависят от параметров системы только ближайших уровней, т. е. в соотношениях (1)  $j = i - 1, i + 1$ .

Будем считать, что задача  $J = F(x, y)$ ,  $\forall y \in Y$ , на каждом структурном уровне является устойчивой



по Ж. Адамару [4] на тройке метрических пространств  $(G, X, Y)$ . Необходимо отметить, что если параметр  $y$  является случайной величиной, то пространства  $G, Y$  должны иметь вероятностную меру [6].

В этом случае неустойчивость всей структурной модели будет связана только с некорректностью задачи (1). Эта некорректность может быть двух типов. Первая связана с попыткой определения вектора  $y$  из решения обратной задачи на данном структурном уровне при фиксированных значениях вектора  $x$ . Тогда оператор  $f = F^{-1}$  и задача  $y = F^{-1}(J, \bar{x})$  называется задачей идентификации и в общем случае является некорректной [4].

Второй тип некорректности связан с задачей синтеза производственной системы [2], когда вектор  $y_i$  является агрегат-оператором векторов  $x_{i+1}, y_{i+1}$ . Очевидно, что вектору  $y_i$  могут соответствовать различные системы взаимодействующих элементов на  $(i+1)$ -м структурном уровне, заданном оператором  $f_{i+1}$ . Другими словами, от того, какие неопределенности и управляющие решения возникают на нижних уровнях, зависит уровень неопределенности на верхних уровнях системы управления. Важную роль играют способы передачи информации с нижнего на верхний уровень (обратные связи), которые задаются видом оператора  $f_{i+1}$ . Если обратные связи являются положительными, то система управления становится неустойчивой даже по отношению к неопределенностям, возникающим внутри самой системы, что часто наблюдается на практике.

## 2. ПРИНЦИП УСТОЙЧИВОСТИ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

Далее будем рассматривать только второй тип некорректности, который напрямую связан с необходимостью построения иерархической структурной модели управления. Как известно [5], любой вид иерархии связан с потерей части информации при переходе с одного уровня на другой. Иерархия считается удачной относительно поставленной цели, если уровень неопределенности системы снижается по сравнению с системой без иерархии. С другой стороны, согласно закону сохранения организации [5], замкнутая система на каждом структурном уровне имеет постоянную сумму реализованной неопределенности (организации) и нереализованной неопределенности (деорганизации). Это означает, что для устойчивой производственной системы с уменьшением масштабного уровня число  $K$  элементов системы возрастает, но организация этой подсистемы также должна возрастать, а неопределенность по отно-

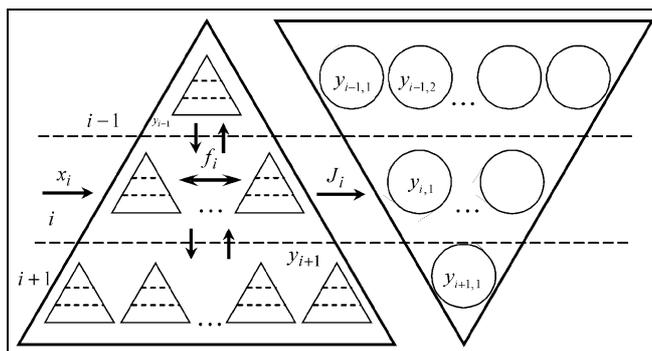


Рис. 1. Иерархическая структура модели системы управления

шению к поставленной цели уменьшаться. Другими словами, при увеличении элементов системы ее организованность должна возрастать благодаря механизмам самоорганизации и проявляться в некотором новом системном свойстве, которое можно описать меньшим числом параметров порядка  $u$ . Это схематично можно отобразить в виде двух конусов (рис. 1). Первый из них представляет иерархическую структурную модель управления системы, а второй (перевернутый) — необходимое снижение неопределенности системы при увеличении структурного уровня.

Очевидно, что если выполняется условие  $\lim_{i \rightarrow n} m_i = 0$ , то модель становится устойчивой не

только на  $n$ -м уровне, но и в целом. Однако на практике при математическом моделировании сложных производственных систем трудно добиться, чтобы неопределенность полностью бы исчезала. Это ведет к неустойчивости модели и неоднозначности решения. Поэтому необходимо стремиться к меньшему числу неопределенных параметров на каждом структурном уровне, а на последнем уровне степень неопределенности  $m$  не должна превышать заданного числа  $\varepsilon$ , при котором задача (1) еще остается корректной. Например, если мерой неопределенности системы является число параметров неопределенности, то в качестве  $\varepsilon$  можно взять 1. Из этого условия можно находить необходимое число структурных уровней  $n^*$  (рис. 2). Управляя этим параметром порядка на заданном множестве, можно добиться достижения поставленной цели при устойчивом поведении структурной модели. Все вышесказанное можно сформулировать в виде следующего принципа устойчивости структурной модели [7].

*Для абсолютной устойчивости иерархической  $n$ -уровневой структурной модели замкнутой производственной системы достаточно, чтобы функция, задающая неопределенность параметров на каждом структурном уровне, была монотонно убывающей и*

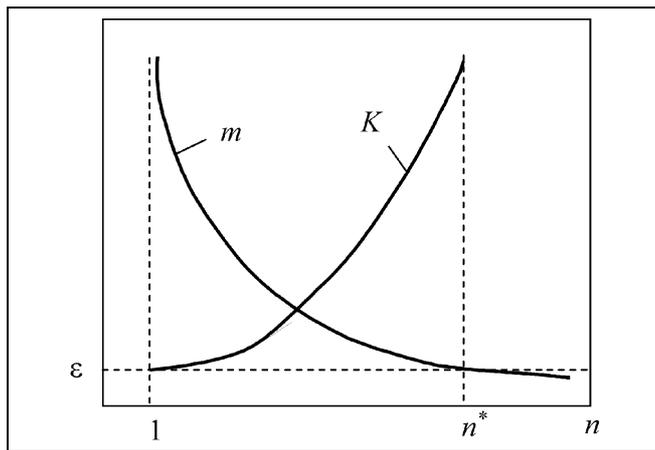


Рис. 2. Зависимость неопределенности системы от числа уровней

выполнялось условие  $\lim_{i \rightarrow n} m_i = 0$ . Для  $\varepsilon$ -устойчивости системы должно существовать такое  $n^*$ , при котором  $\lim_{i \rightarrow n} m_i \leq \varepsilon$ .

Сформулированный принцип несложно обобщить на случай стохастической устойчивости [8], если ввести вероятностную меру неопределенности параметров модели.

### 3. УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Рассмотрим применение данного принципа к построению системы управления дискретным производством. Управление производством представляет собой сложный процесс, протекающий во времени в условиях недостаточной текущей информации и непрерывно возникающих конфликтов между элементами системы, вызванных различными интересами у элементов, связанных как производственными, так и социальными отношениями. Как известно [2], обычно планирование и управление производством осуществляется на трех структурных уровнях: стратегическом, тактическом и оперативном. На каждом из них имеется свой необходимый объем информации, без которого управление становится невозможным. На стратегическом уровне решается задача формирования производственной программы на планируемый период времени с учетом спроса на планируемую продукцию, ценовой политики, мощности предприятия, возможных действий конкурентов, а также выгодности имеющихся заказов. Результатом ее решения является главный календарный план производства, оптимальный в смысле прибыльности предприятия, но учитывающий только ограничения на суммарную мощность и основные ресурсы предприятия. Поэтому без учета интере-

сов производства этот план вряд ли будет выполнен. Проблема заключается в том, как учесть все потребности производства, не снизив значительно прибыльности предприятия. Здесь могут применяться различные управленческие решения. Обычно в план закладывается определенный страховой запас на ресурсы, который затем используется на тактическом и оперативном уровнях управления. Очевидно, что чем больше запас, тем устойчивей производственная система, но эффективность ее снижается. Поэтому необходимо уметь рассчитывать минимальный запас, при котором система оставалась бы устойчивой к изменениям состояния отдельных ее элементов. Для этой цели при построении модели системы управления производством необходимо включить в нее так называемые интеллектуальные элементы [9, 10], отвечающие за поддержку принимаемых управленческих решений. В качестве таких элементов могут выступать оптимизационные модели календарного планирования и распределения ресурсов на тактическом и оперативном уровнях управления [10]. Задавая уровень неопределенности на оперативном уровне, с помощью этих элементов возможно обосновать оптимальный план производства, обеспечивающий устойчивость производственной системы.

Наглядными примерами практического применения принципа устойчивости структурной модели могут служить системы производственного планирования JIT (Just In Time — точно в срок) и MRP (Material Requirements Planning — планирование потребности в материалах) [2]. Система JIT относится к вытягивающему типу. Она определяется как система производства необходимых компонентов изделий в требуемых количествах точно в то время, когда в них возникает потребность. Момент возникновения потребности в изделиях для данного производственного подразделения определяется следующим по технологической цепочке производственным подразделением, которое «вытягивает» из предшественника требуемые комплектующие путем обращения к нему с соответствующим заказом. В результате наибольшая часть неопределенных для предприятия параметров сосредотачивается на верхних уровнях управления, сталкивающихся с независимым спросом на этапе составления бизнес-планов, планов продаж и операций, а также главных календарных планов производства. На нижних уровнях управления в производственных подразделениях неопределенные параметры практически отсутствуют, так как действия каждого из этих подразделений оперативно и точно регулируются заказами, поступающими от следующего смежного подразделения. Поэтому данную модель системы управления можно отнести к абсолютно устойчивой. Однако для ее внедрения на предприятии необходимо ор-



ганизовать полный порядок с учетом незавершенного производства и выполнением производственных заказов в срок, что, конечно, не так-то просто реализовать на практике и потому примеров удачного внедрения подобной модели системы управления совсем мало [2].

Система MRP относится к выталкивающему типу. Она определяется как система, планирующая наличие необходимых компонентов изделий в нужном месте в установленное время и в требуемом количестве для наиболее полного удовлетворения зависимого спроса на них. Планирование в системе MRP осуществляется централизованно, при этом каждое производственное подразделение получает конкретное задание на плановый период и отчитывается о его выполнении перед центральным плановым органом предприятия. Каждое отдельное подразделение при таком планировании существует как бы изолированно. Его не интересует, что будет с продукцией, которое оно отправило в следующее смежное подразделение или на промежуточный склад. В результате число неопределенных параметров для производственных подразделений предприятий, применяющих систему MRP, увеличивается. При этом резко возрастает роль обратных связей, благодаря которым корректируются производственные планы отдельных подразделений предприятия. Для уменьшения возникающей неопределенности производственные подразделения создают страховые запасы необходимых компонентов изделий, что отрицательно сказывается на эффективности работы предприятия. Размер этих страховых запасов может служить мерой неопределенности при управлении производством на каждом уровне планирования. Поэтому данную модель управления можно считать  $\epsilon$ -устойчивой в том случае, когда размер страхового запаса достаточен, чтобы уровень неопределенности на нижнем уровне планирования позволял выполнить все производственные задания в срок. При попытке необоснованного снижения страховых запасов с целью повышения эффектив-

ности производства возможна потеря устойчивости системы управления MRP, что часто наблюдается на предприятиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

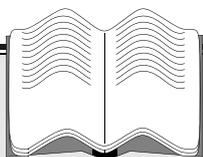
Применение предложенного принципа устойчивости структурной модели позволяет построить иерархическую трехуровневую модель управления и рассчитать с ее помощью оптимальный план производства, обеспечивающий не только его эффективность, но и устойчивое развитие предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Введение в математическое моделирование: Учебное пособие* / Под ред. П.В. Трусова. — М.: Логос, 2005. — 440 с.
2. *Дэниел О'Лири. ERP-системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия.* — М.: ООО «Вершина», 2004. — 272 с.
3. *Пранцишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности.* — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.* — М.: Наука, 1986. — 288 с.
5. *Горский Ю.М. Системно-информационный анализ процессов управления.* — Новосибирск: Наука, 1988. — 327 с.
6. *Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа.* — СПб.: Изд-во СПб ГТУ, 2001. — 521 с.
7. *Столбов В.Ю., Гитман М.Б. Принцип структурной устойчивости и его применение при математическом моделировании физико-механических систем // Материалы 2-й междунар. конф. «Инфоком-2».* — Ставрополь, 2006. — С. 123—129.
8. *Gitman I.M., Gitman M.B. and Askes H. Quantification of stochastically stable representative volumes for random heterogeneous materials // Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv). Publisher: Springer-Verlag GmbH.* — 2006. — Vol. 75, N 2, 3. — P. 79—92.
9. *Цыганов В.В., Бородин В.А., Шишкин Г.Б. Интеллектуальное предприятие.* — М.: Университетская книга, 2004. — 770 с.
10. *Столбов В.Ю., Гитман М.Б., Федосеев С.А. Структурная модель интеллектуальной системы управления производством // Материалы 2-й междунар. конф. «Инфоком-2».* — Ставрополь, 2006. — С. 189—194.

☎ (342) 239-12-97, e-mail: svu@matmod.pstu.ac.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским. □



## Уважаемые читатели!

С экстратекстом журнала "Проблемы управления" вы можете ознакомиться в Интернете, посетив сайт <http://www.extratext.by.ru/>.

*Экстратекст* — это новый инструмент информационной поддержки инноваций.

*Экстратекстом* научной статьи мы называем информационный объект, элементами которого являются: Библиографическое описание, Аннотация, Введение, Заключение (выводы) и Список литературы.

*Экстратекст* дает сжатое представление о перечне и сути рассматриваемых вопросов, полученных результатах, позиции и эрудиции автора.

Об экстратексте читайте статью В.Л. Эпштейна в следующем номере журнала.

Редакция

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОГО ВООРУЖЕННОГО КОНФЛИКТА

Б.Б. Буянов, Н.В. Лубков, Г.Л. Поляк

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Рассмотрена динамика изменения численности войск двух сторон конфликта, продолжающегося длительное время. На основании среднестатистических потерь сторон за некоторый предшествующий период построена модель, позволяющая прогнозировать численность войск сторон с учетом потерь и ввода резервов.

## ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху войны происходят между странами, несоизмеримыми по военной мощи. Поэтому войсковая операция заканчивается достаточно быстро победой сильнейшей из сторон. Но вслед за этим может начаться война сопротивления, которая иногда длится довольно долго. В этом случае процесс военных действий между оккупационной группой войск и силами сопротивления принимает стационарный характер с установившимися статистически средними потерями в течение определенного времени (например, календарного года). Может оказаться, что одна из сторон или обе, вводят в действие дополнительные силы. В этом случае каждая из сторон должна прогнозировать последствия таких шагов, определяя возможные потери как противника, так и собственные потери. Кроме того, представляет интерес динамика изменения численности сил сторон во времени, которая зависит от быстроты замещения потерь и ввода новых резервов.

Ответы на эти вопросы можно получить, применив метод математического моделирования, использующий в качестве исходных данных статистически средние показатели потерь сторон.

## 1. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОТИВОБОРСТВА СТОРОН

Положим, что в среднем численность войск в момент времени  $t$  оккупирующей стороны  $X$  составляет  $x(t)$ , а оккупированной стороны  $Y$  соответственно  $y(t)$ .

Можно принять, что при данных численностях войск  $x$  и  $y$  сторон математические ожидания удельных потерь одной стороны в расчете на единицу личного состава противоборствующей стороны составляют  $a$  [1/мес] — для стороны  $Y$  и, соответственно,  $b$  [1/мес] — для стороны  $X$ .

Вообще говоря, удельные потери  $a$  и  $b$  могут изменяться во времени (например, сезонные изменения в течение календарного года) или зависеть от значений  $x(t)$  и  $y(t)$ . Однако при небольших изменениях  $x(t)$  и  $y(t)$  можно считать  $a$  и  $b$  независимыми от  $x(t)$  и  $y(t)$ . В дальнейшем значения  $a$  и  $b$  принимаются постоянными и равными статистически средним значениям, установившимся при данной численности  $x(t)$  и  $y(t)$ .

Тогда математические ожидания потерь сторон за некоторый промежуток времени

$$S_x = \int_0^t by(t)dt \quad (1)$$

для стороны  $X$  и

$$S_y = \int_0^t ay(t)dt. \quad (2)$$

для стороны  $Y$ :

Математическая модель изменения средних значений  $x(t)$  и  $y(t)$  может быть построена на основе уравнений динамики средних [1], частными видами которых, в зависимости от условий информированности сторон, являются уравнения Ланчестера, Вольтерра, Брэкни и др. [2]. Для нашего случая подходят уравнения Ланчестера, получен-



ные в условиях полной информированности противников о результатах боевых действий:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -by(t) + u(t), \quad (3)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ax(t) + v(t), \quad (4)$$

где  $u(t)$  и  $v(t)$  — размеры вводимых резервов в момент времени  $t$  стороны  $X$  и стороны  $Y$  соответственно.

Ввод резервов необходим для компенсации потерь, а также для изменения состава сил. Поскольку потери должны компенсироваться в течение всего времени боевых действий, а ввод и вывод сил также распределен во времени, то эти процессы можно моделировать по закону непрерывной обратной связи, пропорционально разности между желаемым и фактическим значениями  $x$  и  $y$ , т. е. будем считать

$$u(t) = K_x(x_T - x(t)),$$

$$v(t) = K_y(y_T - y(t)),$$

где  $x_T$  и  $y_T$  — заданные желаемые значения численности группировок сторон  $X$  и  $Y$ ,  $K_x$  и  $K_y$  — коэффициенты усиления, определяющие скорость замены или ввода-вывода войск соответствующих сторон конфликта.

При этих предположениях уравнения (3) и (4) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -by(t) + K_x(x_T - x(t)), \quad (5)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ax(t) + K_y(y_T - y(t)). \quad (6)$$

Коэффициенты  $K_x$  и  $K_y$  в уравнениях (5) и (6) обратно пропорциональны постоянным времени, а, следовательно, времени установления переходных процессов. Из теории регулирования [3] известно, что время установления нового значения процесса равно примерно  $3 \div 4$  постоянным времени.

Поэтому можно записать

$$t_{уст.x} = (3 \div 4) \frac{1}{K_x}, \quad t_{уст.y} = (3 \div 4) \frac{1}{K_y}.$$

Из системы уравнений (5) и (6) получим характеристическое уравнение

$$\alpha^2 + (K_x + K_y)\alpha + (K_x K_y - ab) = 0,$$

корнями которого являются

$$\alpha_{1,2} = \frac{-(K_x + K_y) \pm \sqrt{(K_x + K_y)^2 - 4(K_x K_y - ab)}}{2}.$$

При  $(K_x + K_y)^2 - 4(K_x K_y - ab) = (K_x + K_y)^2 + 4ab > 0$  оба корня уравнения действительны.

При

$$K_x K_y - ab > 0 \quad (7)$$

оба корня отрицательны.

При условии  $K_x K_y - ab \leq 0$  один корень неотрицателен, а другой отрицателен.

В первом случае наблюдается длительное противостояние, когда при заданных  $x_T$  и  $y_T$  численность обеих сторон устанавливается на некоторых значениях. Во втором случае одна из сторон не может восполнить свои потери и конфликт заканчивается ее поражением.

Решение уравнений (5) и (6) при заданных начальных условиях  $x_0$  и  $y_0$  может быть найдено численными методами. В случае, если  $a$  и  $b$  постоянные, не зависящие от времени, то решение может быть найдено в квадратурах.

Введем обозначения

$$m_1 = K_y x_0 - b y_0 + K_x x_T,$$

$$m_2 = K_x y_0 - a x_0 + K_y y_T,$$

$$n_1 = K_x K_y x_T - b K_y y_T,$$

$$n_2 = K_x K_y y_T - a K_x x_T.$$

Тогда

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[ \left( \alpha_1 x_0 + m_1 + \frac{n_1}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 t} - \left( \alpha_2 x_0 + m_1 + \frac{n_1}{\alpha_2} \right) e^{\alpha_2 t} \right] + \frac{n_1}{\alpha_1 \alpha_2}, \\ y(t) &= \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[ \left( \alpha_1 y_0 + m_2 + \frac{n_2}{\alpha_1} \right) e^{\alpha_1 t} - \left( \alpha_2 y_0 + m_2 + \frac{n_2}{\alpha_2} \right) e^{\alpha_2 t} \right] + \frac{n_2}{\alpha_1 \alpha_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

При условии (7) из этих уравнений после некоторых преобразований нетрудно получить установившиеся средние численности сторон

$$x_{уст} = \left( x_T - \frac{b}{K_x} y_T \right) / \left( 1 - \frac{ab}{K_x K_y} \right),$$

$$y_{уст} = \left( y_T - \frac{a}{K_y} x_T \right) / \left( 1 - \frac{ab}{K_x K_y} \right).$$

Отсюда следует, что каждая из сторон может свести сопротивление противника к нулю, добившись, соответственно, чтобы значение  $x_{уст}$  или для другой стороны  $y_{уст}$  равнялось бы нулю. Это условие означает, что резервы противника уничтожились бы до введения их в боевые действия.

Для стороны  $X$  сопротивление стороны  $Y$  равно нулю, если  $x_T = \frac{K_y}{a} y_T$ , а для стороны  $Y$  соответственно  $y_T = \frac{K_x}{b} x_T$ .

Значения потерь за время  $t$  можно получить в квадратурах по формулам (1) и (2)

$$S_x = \frac{b}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[ \left( y_0 + \frac{m_2}{\alpha_1} + \frac{n_2}{\alpha_2} \right) e^{\alpha_1 t} - \left( y_0 + \frac{m_2}{\alpha_2} + \frac{n_2}{\alpha_2} \right) e^{\alpha_2 t} \right] + \frac{n_2}{\alpha_1 \alpha_2} t - \frac{m_2}{\alpha_1 \alpha_2} - \frac{n_2}{\alpha_1 \alpha_2} (\alpha_1 - \alpha_2),$$

$$S_y = \frac{a}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[ \left( x_0 + \frac{m_1}{\alpha_1} + \frac{n_1}{\alpha_2} \right) e^{\alpha_1 t} - \left( x_0 + \frac{m_1}{\alpha_2} + \frac{n_1}{\alpha_2} \right) e^{\alpha_2 t} \right] + \frac{n_1}{\alpha_1 \alpha_2} t - \frac{m_1}{\alpha_1 \alpha_2} - \frac{n_1}{\alpha_1 \alpha_2} (\alpha_1 - \alpha_2).$$

## 2. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ СТРАТЕГИИ

Предложенная модель развития боевых действий была применена для прогнозирования развития боевых действий с целью выявления численности группировки  $x_T$  и интенсивности ввода резервов  $K_x$ , обеспечивающего наибольшее преимущество стороне  $X$  по наиболее важным критериям.

Будем исходить из того, что численность армии стороны  $X$  составляет  $x = 134,5$  тыс. чел., а численность сил сопротивления стороны  $Y$  соответственно  $y = 50$  тыс. чел.

Среднестатистические потери сторон определим из следующих соображений.

Пусть силы сопротивления стороны  $Y$  в среднем наносят армии стороны  $X$  потери 100 чел./мес. Тогда коэффициент в уравнении (3)

$$b = \Delta x / y = 100 / 50 \cdot 000 = 0,002 \text{ [1/мес]}.$$

Предположим, урон, наносимый армией стороны  $X$  силам сопротивления стороны  $Y$  в расчете на единицу личного состава стороны  $X$ , в 2,5 раз больше. Тогда, коэффициент в уравнении (4)

$$a = \Delta y / x = 2,5 \cdot 0,002 = 0,005 \text{ [1/мес]}.$$

Для моделирования приняты значения коэффициентов  $K_x = 0,5 \dots 1$  [1/мес],  $t_{уст,x} \cong 6 \dots 3$  мес и  $K_y = 1$  [1/мес],  $t_{уст,y} \cong 3$  мес. Исходя из этого, интервал моделирования принят 12 мес.

Наилучший сценарий выбирается по результатам моделирования вариантов  $w$ , представленных в таблице. Каждый вариант представлен набором параметров модели  $\{(x_T, K_x), (y_T, K_y)\}$ . Изменение параметров  $(y_T, K_y)$  призвано обеспечить учет неопределенности относительно сил стороны  $Y$ .

Наиболее предпочтительный вариант следует рассматривать как решение на операцию, или, если боевые действия уже ведутся, как управление.

Для характеристики результата моделирования каждого сценария разработаны восемь показателей. Принимая во внимание важное общественное и политическое значение фактора потерь личного состава, все показатели связаны с этим фактором и образуют четыре пары:

- абсолютные потери личного состава  $\Delta x, \Delta y$ ;
- относительные потери личного состава  $\Delta x/x, \Delta y/y$ ;
- несоответствие численности состава плановому  $x_T - x, y_T - y$ , что характеризует недостаточную интенсивность восполнения потерь;
- относительное несоответствие  $(x_T - x)/x, (y_T - y)/y$ .

Показателям присваивались значения, получившиеся в результате моделирования на конец интервала в 12 мес. Всего было рассчитано 10 вариантов сценариев. На рис. 1 приведены графики переходного процесса для варианта  $w_7$ .

Варианты сценария сравнивались по векторному критерию согласно методологии, изложенной в работе [4]. Элементами векторного критерия приняты абсолютные потери личного состава  $\Delta x$  и  $\Delta y$ ,

Значения исходных данных для моделирования

$y_T$ $K_y = 1$	$x_T, K_x$				
	$x_T = 100$ $K_x = 0,5$	$x_T = 134,5$ $K_x = 0,5$	$x_T = 155$ $K_x = 0,5$	$x_T = 200$ $K_x = 0,5$	$x_T = 134,5$ $K_x = 1$
$y_T = 50$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_9$
$y_T = 75$	$w_5$	$w_6$	$w_7$	$w_8$	$w_{10}$

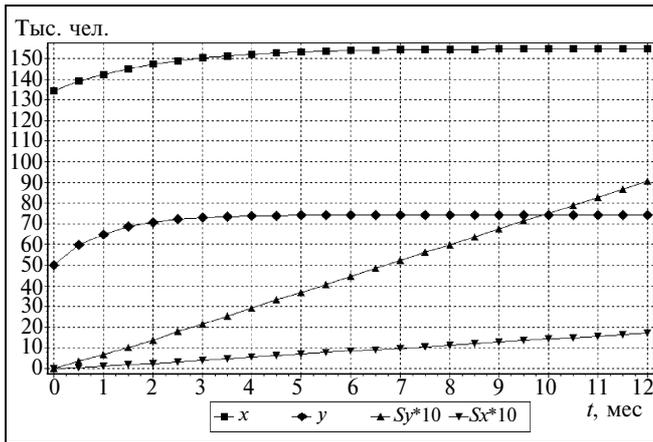


Рис. 1. Графики переходного процесса для сценария  $w_7$

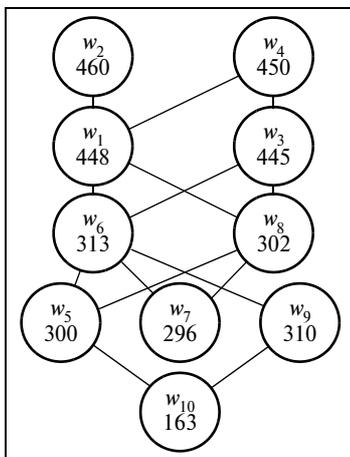


Рис. 2. Граф отношений предпочтительности на множестве сценариев

численность группировки  $x_T$  и интенсивность ввода резервов  $K_x$ .

В зависимости от того, на чьей стороне решается задача, определяются показатели, которые должны быть минимизированы, а какие, наоборот, максимизированы. Напомним, что задачу решает сторона  $X$ . Желательно минимизировать собственные потери и нанести больший ущерб противнику при минимальных затратах. Поэтому минимизируются собственные потери  $\Delta x$  и затрачиваемые на достижение этой цели усилия (показатели  $x_T$  и  $K_x$ ). Показатель  $\Delta y$  максимизируется.

Варианты по векторному критерию упорядочивались в предположении, что относительная важность показателей  $\Delta x$ ,  $x_T$ ,  $\Delta y$  и  $K_x$  одинакова.

На рис. 2 приведен граф, отображающий отношения предпочтения на множестве стратегий. Вершины графа соответствуют сценариям, цифры в вершинах — номерам вариантов и полезности каждого из них по некоторой шкале. Анализ графа показывает, что наиболее предпочтительной стра-

тегией для стороны  $X$  является стратегия  $w_2$  при прогнозируемых стратегиях стороны  $Y$ . Отметим неэффективность увеличения интенсивности ввода резервов (показатель  $K_x$ , стратегии  $w_9$  и  $w_{10}$ ). Таким образом, при высказанных предпочтениях, рекомендуется сохранять существующее равновесие сил. Если же не придавать большого значения затратам на увеличение численности своих войск (например, понизить важность показателя  $x_T$ ), то результат изменится в пользу стратегий  $w_3$  или  $w_4$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция прогнозирования развития военных действий по статистической информации реализована в математической модели динамики длительного вооруженного конфликта. В основу модели положены уравнения динамики боя Ланчестера. Предложено описывать введение резервов противоборствующими сторонами на основе принципа обратной связи. В этом случае на динамику конфликта оказывает влияние скорость введения резервов. Динамика процесса изменения численности войск будет всегда носить монотонный характер (не будет колебательного процесса), что согласуется с реальной динамикой боевых действий.

Модель может быть полезна при прогнозировании развития боевых действий в конфликтной ситуации для обоснования и выбора решения по управлению войсками. На примере, построенном по опубликованным данным о войне в Ираке, может быть показано, что принятие решения о введении дополнительного контингента войск (20 тыс. чел.) будет оправданным, если затраты на содержание войска, связанные с этой операцией, будут менее важны, чем другие показатели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абчук В.А., Матвейчук Ф.А., Томашевский Л.П. Справочник по исследованию операций. — М.: Воениздат, 1979.
2. Трухаев Р.Н., Хоменюк В.Б. Методы оптимизации информационных систем поиска и обнаружения. — Л.: Военно-морская академия, 1973.
3. Айзерман М.А. Лекции по теории автоматического регулирования. — М.: Гостехиздат, 1956.
4. Буянов Б.Б., Лубков Н.В., Поляк Г.Л. Система поддержки принятия управленческих решений с применением имитационного моделирования // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 43–49.

☎ (495) 334-78-01, e-mail: lfbu@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.Г. Воликом. □

# МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОСТАВКИ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ В КРУПНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУРАХ

Н.Б. Баканова, В.М. Вишневецкий, О.В. Семенова

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, г. Москва*

Рассмотрена математическая модель процессов приема корреспонденции, позволяющая оценить эффективность работы программно-технического комплекса автоматизированного оповещения адресатов и другие характеристики, связанные с решением задачи оперативной доставки корреспонденции в крупных организационных структурах.

## ВВЕДЕНИЕ

Крупные государственные организации, реализующие функции управления, ежегодно обрабатывают значительные потоки документов, измеряемые десятками и сотнями тысяч единиц. Обработка таких информационных потоков осуществляется с помощью автоматизированных систем документооборота, в которых отслеживаются все технологические операции, связанные с прохождением документов внутри организации. При этом автоматизированные системы не исключают информационный поток на материальных носителях, а сопровождают его. Это замечание особенно важно для документооборота в государственном секторе, так как в соответствии с Государственной системой документационного обеспечения управления основной объем информационного взаимодействия с внешними организациями осуществляется на бумажных носителях [1, 2].

Таким образом, в процессе документооборота организации участвуют потоки документов на материальных носителях. В автоматизированную систему они поступают в том случае, если подлежат регистрации. К нерегистрируемому потоку относится корреспонденция, поступающая в виде посылок, бандеролей, книг, каталогов и т. п.

Регистрация документов в крупных организациях типа министерств и ведомств осуществляется

как распределенный процесс, предусматривающий выполнение этой процедуры в том подразделении, которому адресовано данное отправление. Независимо от того, регистрируется или не регистрируется корреспонденция, она должна быть оперативно получена внутренними адресатами организации для последующей обработки и своевременного принятия управленческих решений.

К общему объему внутреннего документопотока добавляются документы, передаваемые между подразделениями. В итоге суммарный внутренний информационный поток характеризуется значительным объемом и, соответственно, его организация существенно сказывается на показателях эффективности документооборота и на процессах управления в целом.

Анализ процедур прохождения внутренних документопотоков организации можно провести на основе математического аппарата систем массового обслуживания, который позволяет рассмотреть модель прохождения корреспонденции, выделить узловые пункты процесса, определить нагрузки и минимальное среднее время доставки корреспонденции [3].

Для построения модели определим перечень работ, которые связаны с материальными потоками информации:

- прием входного информационного потока;
- прием документов внутреннего потока;



- распределение входного информационного потока по адресатам;
- распределение внутреннего информационного потока по адресатам;
- доставка корреспонденции адресатам (оповещение);
- формирование выходного информационного потока.

Реализация всех перечисленных работ в крупных организациях возлагается на специализированное подразделение (экспедицию), которое является узловым пунктом, обеспечивающим распределение входящих и внутренних потоков информации по адресатам [4].

Основой операций приема и распределения информации служит процедура сортировки корреспонденции, для которой используются специальные ячейки ограниченного объема. Каждая ячейка предназначена для конкретного адресата — получателя корреспонденции. В ячейки раскладывается поступающая корреспонденция и выполняется процедура оповещения адресатов.

Для оповещения адресатов можно традиционно воспользоваться телефоном или электронной почтой. Однако при большом числе адресатов передача информации будет занимать значительное время, особенно с учетом отказов в обслуживании (занято, отсутствие абонента на рабочем месте, набор альтернативных номеров и др.).

В данной статье рассматривается математическая модель процессов приема корреспонденции, позволяющая оценить эффективность работы программно-технического комплекса автоматизированного оповещения адресатов и другие характеристики, связанные с решением задачи оперативной доставки корреспонденции внутри организации.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Работа предлагаемого комплекса описывается системой массового обслуживания с  $N$  очередями и групповым обслуживанием. Поток поступающих документов — пуассоновский поток с параметром  $\Lambda$ . Поступающая заявка с вероятностью  $a_i$  отправляется в очередь  $i$  ( $i = \overline{1, N}$ ). Функционирование каждой очереди не зависит от остальных, поэтому можно рассматривать  $i$ -ю очередь как систему массового обслуживания с простейшим входным потоком с параметром  $\lambda_i = a_i \Lambda$ ,  $i = \overline{1, N}$ , и опустить в дальнейшем индекс  $i$ .

Полагаем, что каждая очередь имеет неограниченное число мест для ожидания, а групповое об-

служивание заявок происходит мгновенно через случайное время, распределенное по произвольному закону  $B(t)$  со средним  $b$  и вторым моментом  $b^{(2)}$ . При этом обслуживаются все заявки, которые накопились в очереди к моменту начала обслуживания. Обслуживание можно интерпретировать как мгновенный уход всех заявок из системы через случайные интервалы времени с функцией распределения  $B(t)$ .

Отыскиваются характеристики производительности системы: среднее число заявок в системе и распределение времени ожидания в стационарном режиме.

Модели с групповым обслуживанием исследовались в работах [5, 6], однако в них предполагалось, что сервер обслуживает одновременно группу заявок, число которых не превышает заданного значения, и время обслуживания отлично от нуля.

## 2. РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ И СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Предположим, что система функционирует в стационарном режиме. Рассмотрим моменты обслуживания  $t_n$ ,  $n \geq 1$ .

Обозначим через  $\pi_i$  стационарную вероятность того, что к произвольному моменту  $t_n$  в очереди накопилось  $i$  заявок,  $i \geq 0$ . Эти вероятности определяются равенствами

$$\pi_i = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} dB(t), \quad i \geq 0. \quad (1)$$

Поясним формулу (1). Пусть момент времени 0 — это некоторый момент обслуживания, тогда  $dB(t)$  есть вероятность того, что следующий момент обслуживания наступит в интервале времени

$(t, t + dt)$ . Величина  $\frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}$  определяет вероятность того, что за время  $(0, t)$  в систему поступит

ровно  $i$  заявок. Тогда выражение  $\frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} dB(t)$  есть вероятность того, что длительность времени между моментами обслуживания заключено в интервале  $(t, t + dt)$  и за это время в систему поступит  $i$  заявок.

Введем производящую функцию  $\Pi(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i z^i$  вероятностей  $\pi_i$ ,  $i \geq 0$ . Умножая  $i$ -е равенство (1) на

$z^i$  и суммируя полученные равенства по всем  $i \geq 0$ , получим

$$P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i z^i = \beta(\lambda(1-z)), \quad (2)$$

где  $\beta(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dB(t)$  — преобразование Лапласа—Стилтьеса функции  $B(t)$ .

Вероятности  $\pi_i$ ,  $i \geq 0$ , могут быть получены из равенства (2) как коэффициенты разложения в ряд его правой части [3]. Из него также можно найти среднее число заявок  $M$ , одновременно получающих обслуживание:  $M = P'(1) = \lambda b$ .

Рассмотрим теперь число заявок в системе в произвольный момент времени. Обозначим через  $p_i$  вероятность того, что в произвольный момент в системе находится  $i$  заявок. Эти вероятности определяются равенствами

$$p_i = \frac{1}{b} \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} (1 - B(t)) dt, \quad i \geq 0, \quad (3)$$

которые могут быть получены по аналогии с равенствами (1). Если за начало отсчета принять произвольный момент времени, то время, оставшееся до следующего момента обслуживания, имеет

функцию распределения  $\tilde{B}(t) = \frac{1}{b} \int_0^{\infty} (1 - B(y)) dy$ .

В этом случае вероятность того, что обслуживание произойдет в интервале времени  $(t, t + dt)$ , есть величина  $d\tilde{B}(t) = \frac{1}{b} (1 - B(t)) dt$ .

Для нахождения вероятностей  $p_i$ ,  $i \geq 0$ , введем производящую функцию  $P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i z^i$ . Из равенств (3) получим

$$P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i z^i = \frac{1}{b} \int_0^{\infty} e^{\lambda t z} e^{-\lambda t} (1 - B(t)) dt = \frac{1}{b} \left( \frac{e^{-\lambda t(1-z)}}{-\lambda(1-z)} (1 - B(t)) \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{\lambda(1-z)} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t(1-z)} dB(t) \right),$$

откуда следует равенство

$$P(z) = \frac{1 - \beta(\lambda(1-z))}{\lambda(1-z)}. \quad (4)$$

Вероятности  $p_i$ ,  $i \geq 0$ , могут быть получены разложением в ряд обеих частей равенства (4).

Среднее число заявок в системе в произвольный момент времени вычисляется как

$$L = P'(1) = \frac{1}{\lambda b} \frac{\lambda \beta'(\lambda(1-z))(1-z) + 1 - \beta(\lambda(1-z))}{(1-z)^2} \Big|_{z=1}. \quad (5)$$

При  $z = 1$  числитель и знаменатель дроби в правой части (5) обращаются в ноль. По правилу Лопиталя получим

$$L = \frac{\lambda b^{(2)}}{2b}.$$

Время ожидания как время, оставшееся до момента обслуживания, имеет функцию распределения

$$W(t) = \frac{1}{b} \int_0^t (1 - B(y)) dy.$$

Среднее время ожидания вычисляется как

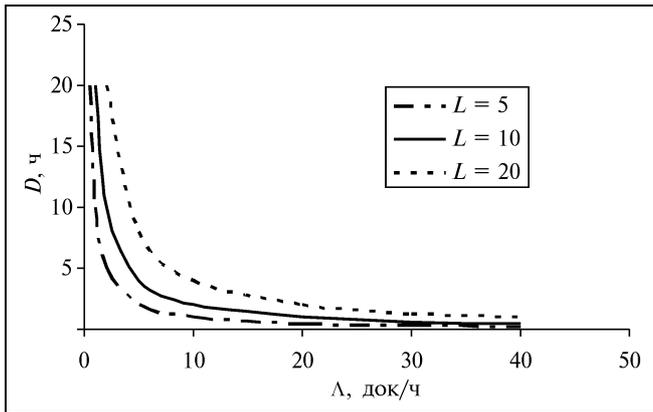
$$w = \frac{b^{(2)}}{2b}.$$

Заметим, что в случае постоянного времени между моментами обслуживания заявок, равного  $D$ , имеем:  $b = D$ ,  $b^{(2)} = D^2$ ,  $w = D/2$ . Средняя длина очереди в этом случае  $L = \lambda D/2$ . Если же время между моментами обслуживания распределено экспоненциально с параметром  $\mu$ , то  $b = 1/\mu$ ,  $b^{(2)} = 2/\mu^2$ , и  $w = 1/\mu$ . Средняя длина очереди  $L = \lambda/\mu$ .

Таким образом, рассмотрена система массового обслуживания с групповым обслуживанием. Для нее получены стационарное распределение вероятностей числа заявок в системе, распределение времени ожидания и среднее время ожидания в случаях постоянного, экспоненциально распределенного и распределенного по произвольному закону времени между моментами обслуживания заявок. Полученные результаты позволяют определить средний объем корреспонденции, ожидающей обработки, и среднее время ожидания.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ приведенных на рисунке зависимостей показывает, что даже при значениях интенсивности потоков  $\lambda = 10$  документов в час время между моментами выборки корреспонденции при  $L = 10$  составляет более двух часов, что соответствует существующей ручной процедуре сортировки корреспонденции и оповещения адресатов. В связи с этим необходима автоматизация описанных выше



**Зависимости времени выборки корреспонденции  $D$  от интенсивности ее потока при фиксированных значениях длины очереди  $L$**

процедур для повышения оперативности ( $D \approx 0,8$  ч), сокращения очереди ( $L = 5$ ) и повышения качества управления.

В интересах Министерства транспорта РФ была разработана система автоматизации процесса оповещения адресатов, в которой применяются программируемые адресные датчики и используется локальная сеть передачи информации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование позволяет определить целесообразность разработки средств автоматизации для решения поставленной задачи, подходы к ее решению, ориентировочные оценки эффективности внедрения.

В процессе развития данного подхода к модели будут подключены дополнительные функции ограничения, в целях упрощения не рассмотренные на данном этапе.

На основе полученных результатов разработана система автоматизации для Министерства транспорта РФ, предназначенная для оперативного оповещения адресатов о поступившей в их адрес корреспонденции и реализованная на базе существующей локальной сети передачи информации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция использования информационных технологий в деятельности федеральных органов государственной власти до 2010 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 сентября 2004 г. № 1244-р).
2. Баканова Н.Б. Проблемы внедрения систем документооборота в государственных организациях // Междунар. практ. конф. «Электронный документооборот и документационное обеспечение управления» / ГУД. — М., 2003. — С. 160—161.
3. Вишневикий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. — М.: Техносфера, 2003.
4. Беляев А.А., Коротков Э.М. Системология организаций. — М.: ИНФРА-М, 2000.
5. Chakravarthy S. Analysis of a finite MAF/G/1 queue with group services // Queueing Systems. — 1993. — Vol. 13 (4). — P. 385—407.
6. Alfa A.S., Dolhun K.L., Chakravarthy S. A discrete single server queue with Markovian arrivals and phase type group services // Journal of Applied Mathematics and Stochastic Analysis. — 1995. — Vol. 8 (2). — P. 151—176.

☎ (495) 694-33-38, 699-56-55,  
e-mail: nina@iitp.ru, vishn@iitp.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
А.С. Манделем. □

## Новые книги

- Пономаренко С. Самоучитель Adobe Acrobat 8. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 304 с.
- Яне Б. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2007. — 584 с.
- Амелькин В.В. Изохронные и импульсные колебания двумерных динамических систем. — М.: URSS, 2006. — 206 с.
- Бабенко Т.И. Методы принятия управленческих решений. — Новосибирск: СО РАН, 2006. — 227 с.
- Боголюбов Н.Н. Собрание научных трудов. — М.: Наука, 2006. — Т. 4. — 432 с.
- Васютинский Н.А. Золотая пропорция. — М., СПб.: ДИЛЯ, 2006. — 367 с.
- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. — М.: Физматлит, 2006. — 813 с.
- Комиссарова В. Программирование драйверов для Windows. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 256 с.
- Кучин Б.Л. Управление развитием экономических систем. — М.: Экономика, 1990. — 157 с.
- Мизес Р. Вероятность и статистика. — М.: URSS, 2006. — 253 с.
- Могилевский В.Д. Формализация динамических систем. — М.: Вузовская книга, 2005. — 214 с.
- Пташинский В.С. 100 программ для карманного ПК Pocket PC: инструментальная книга. — М.: Триумф, 2007. — 416 с. (+CD-ROM).
- Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна. — М.; СПб.: Питер, 2006. — 204 с.
- Степанов Е.О. Математические модели оптимизации транспортных сетей и потоков. — СПб.: ИТМО, 2005. — 244 с.
- Суходольский Г.В. Математическая психология. — Харьков: Гуманитарный Центр, 2006. — 358 с.
- Юревич Е.И. Теория автоматического управления. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 560 с.
- Афонин А.М. Физические основы механики. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 366 с.
- Бабешко Л.О. Основы эконометрического моделирования. — М.: URSS, 2006. — 428 с.
- Вейль Г.К.Х. Классические группы. — М.: URSS, 2007. — 403 с.
- Евгеньев М.И. Контроль экологической безопасности химических производств. — Казань: ГТУ, 2006. — 157 с.

# МЕТОД РАЗДЕЛЕННЫХ ЗАПРОСОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ К ДАННЫМ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В.Н. Лебедев, Е.А. Курако, В.Е. Москальков, Д.В. Москальков, В.Л. Орлов

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Рассмотрена задача управления защищенным доступом к удаленным базам данных при условии обеспечения гибкости запросной системы, безопасности и гарантированности доставки в современных распределенных информационных системах. Предложен метод ее решения, основанный на разделенных запросах, каждый из которых включает в себя фрагмент управления данными и фрагмент управления доступом. Описан механизм действия метода и приведены языковые конструкции фрагментов. Дано сравнение с другими методами.

## ВВЕДЕНИЕ

В распределенных системах обработки, хранения и передачи данных часто возникает необходимость не только обеспечения, но и оперативного управления защищенным доступом (ОУЗД) к удаленным базам данных (БД) из различных географически удаленных точек. Эта проблема особенно актуальна для информационных систем российских и международных правоохранительных органов, вертикально-интегрированных и транснациональных компаний.

Для обеспечения ОУЗД наиболее важно:

- организация гарантированной доставки информации в условиях гетерогенной сетевой среды и некачественных каналов связи;
- обеспечение защиты данных в гетерогенной сетевой среде;
- обеспечение ОУЗД к удаленным БД и гибкого развития запросной системы.

Теоретически предполагается, что удаленный доступ обеспечивается механизмами, предоставляемыми непосредственно системами управления базами данных (СУБД) [1–3]. Однако практически возникают, по крайней мере, три проблемы.

Прежде всего, в СУБД, как правило, не включаются средства гарантированной доставки ин-

формации, что вызывает трудности организации доступа при некачественных каналах связи [4]. Далее, средства защиты, обеспечиваемые СУБД, и корпоративные средства защиты сложно интегрируются, как технически, так и в смысле финансовых и временных ресурсов. Обычно это предмет отдельной разработки. И, наконец, для обеспечения гибкого и управляемого удаленного доступа к данным подразумевается возможность отправки с рабочих мест произвольных SQL-запросов, что вступает в противоречие с требованиями безопасности. Введение ограничений доступа к данным средствами СУБД для различных рабочих мест, с одной стороны, снижает уровень гибкости, с другой — не решает полностью проблемы защиты, так как семантический контроль при этом практически отсутствует.

Проблема организации гарантированной доставки решается обычно путем разделения задачи обработки на клиентскую и серверную части (метод разделения задач). При этом организация доступа по сети может быть реализована различными способами, что обеспечивает надежность транспортировки. Уровень обеспечения безопасности также может быть повышен, но при такой организации снижается гибкость доступа, так как введение новых запросов требует перепрограммирования клиентских программ.



Если же на клиентском уровне подключить механизм сценариев, которые будут интерпретироваться программами сервера приложений, то проблема гибкости решается за счет снижения степени безопасности по причинам, рассмотренным выше.

В данной статье предлагается новый, апробированный на практике метод решения перечисленных задач — *метод разделенных запросов*.

## 1. МЕТОД РАЗДЕЛЕННЫХ ЗАПРОСОВ

Общая схема удаленного доступа к данным с помощью метода разделенных запросов представлена на рис. 1.

Подразумевается конструирование запросов в форме сценариев, что обеспечивает добавление в систему новых возможностей в процессе эксплуатации [5].

Однако, как уже отмечалось, использование сценариев снижает уровень безопасности программного комплекса ввиду невозможности точного прогнозирования содержания сценариев, формируемых на рабочих местах.

Для решения этой проблемы все сценарии (запросы) разделяются на фрагмент управления данными и фрагмент управления доступом.

**Фрагмент управления данными** представляет собой форму ввода параметров запроса, которая размещается на удаленном рабочем месте. Форма ввода имеет формат HTML, что позволяет создавать ее либо на основе ранее подготовленных

HTML-шаблонов, либо с помощью HTML-редактора.

Принципиальное отличие от известных методов состоит в том, что данная форма не поступает по сети от web-сервера, а размещается на рабочем месте в локальной файловой системе, где и активизируется. Программное обеспечение, обслуживающее фрагмент управления данными, выбирает введенные оператором параметры и создает блок данных запроса в формате XML [6], который передается в серверный центр. Таким образом, на рабочем месте формируются только параметры (данные) запроса. Более того, с определенного рабочего места могут приниматься и обрабатываться в серверном центре только определенные наборы данных.

**Фрагмент управления доступом** представляет собой скрипт (интерпретируемую часть сценария), который размещается на сервере приложений. Программное обеспечение обслуживания фрагмента управления доступом обеспечивает прием блоков данных, определяет полномочия пользователя, приславшего тот или иной блок, и в случае положительного решения — формирует SQL-запросы к БД на основе скрипта и блока данных запроса. Результат выполнения запроса — ответ — пересылается на удаленное рабочее место, регистрируется в локальной базе данных и отображается на мониторе.

**Модификация сценариев** одно из преимуществ метода разделенных запросов заключается в простоте модификации запросной системы, например, при изменении структур данных

или требований к запрашиваемой информации. Необходимо лишь обновить оба фрагмента сценария или создать новый сценарий. Фрагмент управления доступом размещается на сервере приложений, а фрагмент управления данными рассылается на удаленные рабочие места, которые должны его использовать. Процесс настройки схематично показан на рис. 2. Отметим, что на рабочем месте новая форма ввода автоматически включается в список поддерживаемых форм.

## 2. ЯЗЫКОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДА РАЗДЕЛЕННЫХ ЗАПРОСОВ

### 2.1. Фрагмент управления данными

Фрагмент управления данными или форма ввода представляет собой файл в HTML-формате. Каждая форма ввода должна содержать, по крайней мере, один тег FORM, который включает в себя элементы ввода данных (теги INPUT,

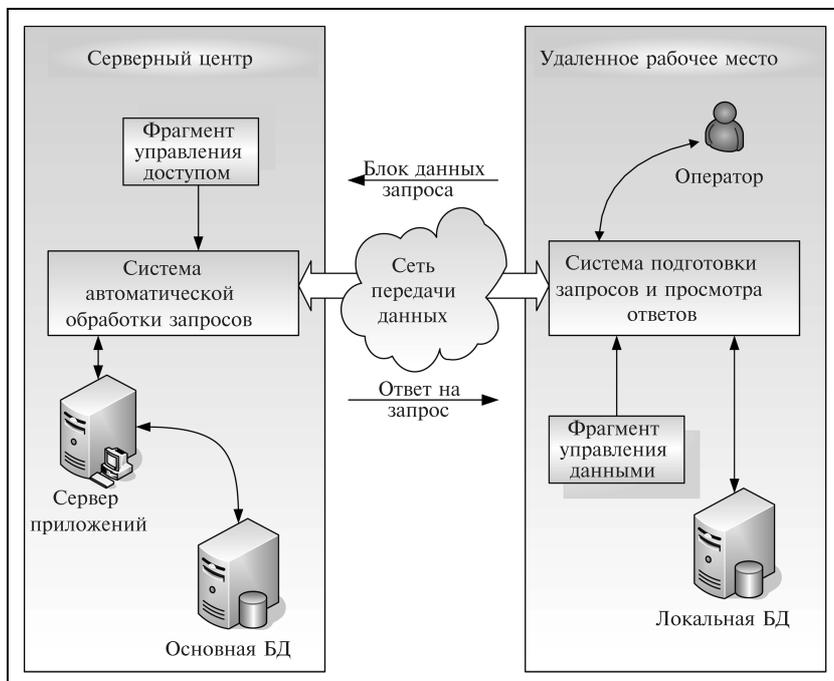
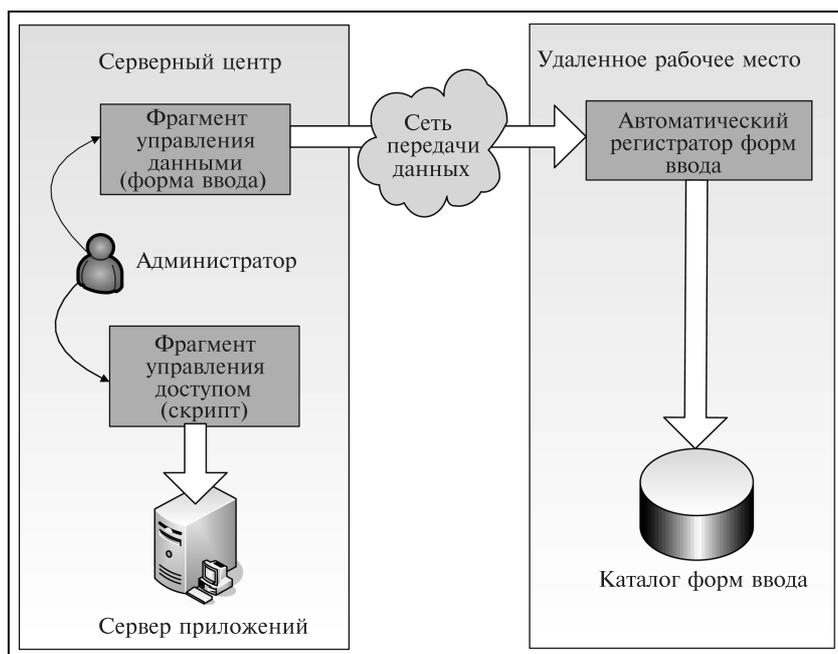


Рис. 1. Схема удаленного доступа к БД с помощью метода разделенных запросов


**Рис. 2. Добавление новых типов запросов**

SELECT и т. д.). Допускается использование в форме ввода различных стилей, скриптов и т. п., например, для контроля вводимых данных.

Для перехода от простой формы ввода к фрагменту управления данными необходимо включить в элемент FORM управляющий список элементов INPUT с атрибутом *hidden*. Этот список обеспечивает полноту и корректность формирования *блока данных запроса*, который создается после ввода данных в форму и предназначается для обработки в серверном центре.

Каждый элемент управляющего списка включает в себя имя элемента (атрибут *name*) и его значение (атрибут *value*). Перечень допустимых имен и описание их значений приведены в табл. 1.

В качестве примера приведем управляющий список вида:

```
<INPUT type=hidden name="H_OBJECT"
value="DocNum,IssuingCountry,DocType">
<INPUT type=hidden name="H_DB"
value="BASE1">
<INPUT type=hidden name="H_FORMAT"
value="FDC">
<INPUT type=hidden name="H_OPTION"
value="OFFLINE">
```

Для контроля корректности ввода данных при заполнении формы используется атрибут *id* каждого элемента ввода данных INPUT типа text. По существу значение *id* представляет собой строку, которая включает в себя перечень интерпретируемых команд контроля ввода данных. Описание каждой команды начинается с символа «\$», за которым следует идентификатор команды. За иден-

тификатором в круглых скобках следует список параметров. Фактическим разделителем элементов списка является знак «\$». В частном случае список может отсутствовать. Перечень команд:

- \$Obl — присутствие этой команды указывает на то, что данное поле ввода обязательно для заполнения;
- \$Len(N) — команда контроля максимальной длины вводимых данных;
- \$Min(N) — команда контроля минимальной длины вводимых данных;
- \$Rus — присутствие этой команды указывает на то, что допускается возможность ввода только русских символов;
- \$Lat — при включении этой команды разрешен ввод только латинских символов;
- \$Dt([format1]<formatTo>,...,[formatN]<formatTo>)

— определение поля как поля ввода даты и указание формата (форматов) даты, например, команда \$Dt([dd.mm.yyyy]<yyyy/mm/dd>,[yyyy]) разрешает ввод даты в двух форматах: dd.mm.yyyy и yyyy (день, месяц, год или просто год).

Пример оформления элемента INPUT:

```
<INPUT type=text name="BirthDate"
id="$Dt([dd.mm.yyyy]<yyyy/mm/dd>,[yyyy])"
size=10>
```

Таблица 1

**Допустимые имена и их значения в управляющем списке**

Имя	Значение
H_OBJECT	Перечень названий полей ввода, значения которых должны отсылаться в серверный центр (разделитель здесь и в дальнейшем — запятая)
H_DB	Перечень идентификаторов баз данных, для которых предназначен запрос
H_FORMAT	Уникальный идентификатор типа запроса, соответствующий идентификатору фрагмента управления доступом, размещенного в серверном центре. Необходим для связывания фрагментов запроса
H_NAME	Текстовое описание данного типа запроса (не обязательно)
H_OPTION	Перечень дополнительных параметров запроса, например, здесь может быть явно указан возможный способ доставки ONLINE и (или) OFFLINE



**Блок данных запроса** представляет собой файл, содержащий текст следующего вида в формате XML:

```
<?xml version="1.0" encoding="WINDOWS-1251" ?>
<MSG>
  <TO TName="..." />
  <FROM FName="..." />
  <DOCUMENT DocNum="..." DocDate="...">
    <BODY ExecutorCode="..." ExecutorName="..." />
    <REQUEST Type="..." DB_ID="..." Name="...">
      <PARAM Name="..." ForeName="..." />
      <PARAM Name="..." ForeName="..." />
    </REQUEST>
  </DOCUMENT>
</MSG>
```

Блок данных включает в себя следующие теги:

- **MSG** — основной тег, определяющий блок данных как сообщение;
- **TO** — содержит имя серверного центра (атрибут TName);
- **FROM** — содержит имя удаленного рабочего места (атрибут FName);
- **DOCUMENT** — содержит служебную информацию для регистрации запроса в БД на серверном центре (атрибут DocNum — регистрационный номер исходящего документа, DocDate — дата и время отправки в формате дд.мм.гггг чч:сс); эта информация формируется динамически во время отправки запроса с удаленного рабочего места;
- **BODY** — содержит информацию об операторе, который непосредственно отправляет данный запрос (атрибут ExecutorCode — код оператора (необязательный параметр), ExecutorName — имя оператора);
- **REQUEST** — содержит информацию о запросе (его тип — Type, название — Name и идентификатор БД — DB\_ID). Эти данные берутся из форм ввода (фрагментов управления данными).

Тег **REQUEST** может содержать внутри себя произвольное число тегов **PARAM**, каждый из которых имеет набор атрибутов, которые должны быть использованы при поиске информации в БД. Наименования атрибутов должны соответствовать наименованиям полей ввода, используемым во фрагменте управления данными, а значения — значениям этих полей, которые ввел оператор при заполнении формы ввода. Эти же имена полей используются во фрагменте управления доступом, обеспечивая связь этого фрагмента с фрагментом управления данными.

В теге **REQUEST** допускается использование списков. Для этого в состав блока данных включается несколько тегов **PARAM**. В этом случае поиск в БД должен вестись по всему перечню наборов данных, и в ответе должен быть представлен суммарный результат.

## 2.2. Фрагмент управления доступом

Синтаксис фрагмента управления доступом базируется на синтаксисе SQL-запросов, но требует включения в текст следующих расширений.

- Каждое поле из перечня, следующего за оператором **SELECT**, должно иметь подполе комментария. Комментарий должен представлять собой описание данного поля. Если для отображения значения данного поля требуется подключение справочника, то после описания в квадратных скобках указывается наименование данного справочника.
- Если в структуре оператора **WHERE** требуется поместить какое-либо значение, то вместо этого значения указывается соответствующее имя атрибута тега **PARAM**, присутствующего во фрагменте управления данными. Имя должно быть заключено в квадратные скобки.
- В случае использования справочников требуется непосредственно за модифицированным SQL-запросом разместить оператор **REFERENCE**, за которым должен следовать перечень строк. Каждая строка должна состоять из наименования справочника, указанного в поле комментария (см. выше) и следующего за ним SQL-запроса, который обеспечит выборку описания поля по значению его кода.

Таким образом, в качестве значений полей, по которым ведется поиск, задаются не статические величины, а переменные, значения которых подставляются из блока данных, т. е. формируется параметрический SQL-запрос. Пример запроса поиска данных по условной базе данных фирм:

```
SELECT
  OBJECT_NUM, /* Идентификатор */
  FIRM_TYPE, /* Тип Фирмы [Типы фирм]*/
  NAME_RUS, /* Название */
  REG_ADDR, /* Адрес регистрации */
  FIRM_INN, /* ИНН */
  FIRM_OPEN_DATE, /* Дата Регистрации */
FROM
  OBJECT_REG R,
  FIRM F,
WHERE
  F.ID_FIRM=R.OBJECT_NUM AND
  R.OBJECT_ID = 'FRM' AND
  F.NAME_RUS like '[FirmName]' AND
  F.FIRM_TYPE='[FirmType]'
REFERENCE
Типы фирм SELECT FIRM_TYPE,FIRMT_NAME
FROM FIRM_TYPE_VOC
```

## 2.3. Ответы на запросы

Ответы на запросы, которые формируются в серверном центре как файлы и отсылаются на удаленное рабочее место, также имеют XML-формат.

Синтаксическая конструкция ответа имеет следующий вид:

```
<?xml version="1.0" encoding="WINDOWS-1251" ?>
<ANSWER>
<INFO DB_ID="..." Req="..." />
<COMMENT>Найдено объектов: 1</COMMENT>
<TABLE>
<FORMAT>
  <COL Name="поле1" Value="FIELD1" />
  ...
  <COL Name="полеN" Value="FIELDN" />
</FORMAT>
<STR FIELD1="значение1-1" ... FIELDN="
значение1-N" />
...
<STR FIELD1="значениеM-1" ... FIELDN="
значениеM-N" />
</TABLE>
</ANSWER>
```

Используемые теги:

- ANSWER — основной тег;
- INFO — тег информации о запросе, на который сформирован ответ, имеет атрибуты:
  - DB\_ID — идентификатор БД, из которой проводилась выборка информации;
  - Req — идентификатор запроса, соответствующий атрибуту DocNum тега DOCUMENT в блоке данных запроса;
- COMMENT — тег комментариев, предназначен для вывода дополнительной информации оператору на удаленном рабочем месте;
- TABLE — тег, включающий в себя данные ответа, которые описываются тегами FORMAT и STR;
- FORMAT — содержит описание столбцов таблицы, причем каждый столбец описывается тегом COL, который определяет столбец таблицы и содержит следующие атрибуты:
  - Name — наименование столбца (будет отображаться в заголовке таблицы);
  - Value — наименование соответствующего атрибута тега STR;
- STR — имеет набор атрибутов, имена которых являются идентификаторами полей ответа, а значения — данными ответа.

### 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Метод разделенных запросов программно реализован и применен в территориально распределенной автоматизированной информационной системе, функционирующей в гетерогенной сетевой среде и основанной на трехзвенной архитектуре (клиент — сервер приложений — сервер БД). В ходе тестирования и последующей эксплуатации системы были получены результаты, подтверждающие гибкость метода в сочетании с обеспечением гарантированной доставки данных и требуемым уровнем информационной безопасности. Резуль-

Сравнение методов удаленного доступа

Метод доступа	Гибкость системы	Гарантированность доставки	Защищенность системы
Метод разделенных запросов	1,86	1,57	1,86
Доступ к данным средствами СУБД	1,43	1	1
Метод разделения задач	0,29	1,57	1,86

таты экспертного сравнения предложенного метода с известными методами удаленного доступа приведены в табл. 2. Каждый из методов оценивался на основании экспертных данных по трем показателям качества решения перечисленных во Введении задач (гибкость, защищенность, гарантированность) и трехбалльной шкале (0 — показатель не обеспечивается, 1 — обеспечивается, 2 — расширенные возможности). В табл. 2 даны средние арифметические значения полученных оценок. Видно, что метод разделенных запросов по этим показателям предпочтителен.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод может быть применен во всех случаях, когда требуется обеспечить управляемый защищенный доступ к удаленным БД из территориально распределенных рабочих мест как в однородной, так и в гетерогенной сетевой среде. Он обеспечивает надежную транспортировку данных, требуемый уровень информационной безопасности и гибкость при модернизации и развитии системы. Метод разделенных запросов программно реализован и внедрен в системе удаленного доступа к БД Национального центрального бюро Интерпола при МВД России и его региональных филиалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньев Б.П., Яковлев С.А. Интеграция распределенных баз данных. — М.: Лань, — 2001.
2. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных. — М.: Вильямс, 1999.
3. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В.В. Корнеев, А.Ф. Гареев, А.Ф., С.В. Васютин, В.В. Райх. — М.: Нолидж, — 2000.
4. Асратян Р.Э., Орлов В.Л., Шинкарьюк А.Г. Единый связной интерфейс. Тр. ПУ РАН. — 2000. — Т. IX.
5. Москальков Д.В. Организация защищенного доступа к удаленным базам данных. Тр. XIII междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем», Москва, декабрь 2005 г., 261—263 стр., М.: РГГУ, 2005.
6. XML. Новые перспективы WWW / Ф. Бумфрей, О. Диренцо, И. Дакетт и др. — М.: ДМК, 2000.

☎ (495) 334-92-81, e-mail: lebvini@pui.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Л. Эпштейном. □



# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ЗАДАЧ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

С.А. Данилова

*Пермский государственный технический университет*

Предложен подход к рациональному планированию аperiodических потоков задач на основе экспертной информации и алгоритмов нечеткого вывода.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные АСУТП характеризуются сложной структурой. В качестве составной части в них входят информационно-управляющие системы, входные информационные потоки в которых представляют собой формируемые источниками информации последовательности требований, поступающих в случайные моменты времени.

Режим реального времени, характерный для современных информационно-управляющих систем, предполагает жесткое лимитирование времени отклика на запрос от объекта, поэтому требуется обеспечить минимальное время отклика системы, а также высокую эффективность использования вычислительных мощностей. Необходимо планировать последовательность обработки запросов, исходя из приоритетов, времени и крайних сроков выполнения, периодов решения задач и др. [1]. Рациональное планирование должно обеспечивать оптимальное распределение процессорного времени при выполнении совокупности задач с различными параметрами в течение заданного периода времени.

## 1. ПЛАНИРОВАНИЕ ПОТОКА ЗАДАЧ В АСУТП

Наиболее успешно достигается планирование детерминированных задач, поскольку их предсказуемость позволяет сделать точный прогноз загрузки еще до начала работы системы. Планирование потока аperiodических запросов в АСУТП при минимизации задержек их выполнения может решаться с помощью детерминированного и веро-

ятностного подходов. Однако их недостатки — использование предельных оценок, снижающее эффективность системы, большой объем вычислений и значительные затраты процессорного времени на расчеты — обуславливают актуальность разработки подхода к планированию аperiodических задач в АСУТП с использованием мнений экспертов, которые формируются у специалистов в процессе накопления производственного и жизненного опыта.

Задача ставится следующим образом. В систему поступает некоторое число запросов жесткого реального времени, характеризуемых четкостью параметров. Параллельно на обработку в систему поступают аperiodические запросы, характеризуемые нечеткостью параметров:  $N$  — число запросов на определенном интервале  $T$ ;  $L$  — длина запросов, определяющая необходимую продолжительность их обслуживания.

При решении задачи планирования аperiodических запросов используется идея серверного подхода, которая заключается в применении специального сервера для обработки аperiodических запросов [2]. Суть серверного подхода заключается в выделении специальной задачи (детерминированной по отношению к другим задачам), обычно самого высокого приоритета, предназначенной для выполнения различных операций (в том числе и аperiodических запросов). Сервер (как любая задача) характеризуется временем выполнения (размером сервера) —  $E_c$  и периодом  $T_c$ , а также загрузкой аperiodическими запросами. Естественно, что для лучшей работы системы в целом загрузка должна стремиться к 100 %.

На этапе проектирования возможно определить максимальные значения числа  $N_{\max}$  и длины  $L_{\max}$  запросов аperiodических задач, что позволяет на основе детерминистского подхода оценить предельное граничное значение размера сервера  $E_{c_{\text{пред}}} = E_{\max} = N_{\max} L_{\max}$ , позволяющее выполнять без потерь обслуживание аperiodических запросов. Однако при таком подходе при всех  $N < N_{\max}$  и  $L < L_{\max}$  часть выделенного интервала  $E_{\max}$  остается неиспользованной, что ведет к снижению эффективности системы. Поэтому в процессе работы необходимо определять параметры сервера для достижения его максимальной загрузки запросами с учетом фактического состояния параметров входного потока ( $N$  и  $L$ ).

В соответствии с постановкой задачи очевидна общая схема управления: необходимо изменять размер сервера  $E_c$  на некоторую величину  $\Delta E$  таким образом, чтобы удовлетворять требуемым соотношениям между числом аperiodических запросов  $N$ , длиной аperiodических запросов  $L$  и значением  $E_c$ .

В терминах нечетких регуляторов роль нечеткого контроллера в системе исполняют программные средства обработки нечетких переменных, а в качестве исполнительного механизма выступает уп-

равляющая программа, обеспечивающая соответствующее увеличение или уменьшение размера выделяемого сервера ( $\Delta E$ ) (рис. 1). Технически устройства, формирующие текущие значения нечетких переменных  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*$ , состояние входного потока аperiodических запросов, выполняются с помощью функциональных средств, реализуемых в аппаратном базисе счетчиков и регистров.

Исходная эмпирическая информация о стратегии управления хранится в базе знаний (БЗ) как совокупность нечетких правил условного логического вывода «если ..., то ...», которые формулируются на основе изучения задачи управления путем опроса специалистов (экспертов).

Для всех входных и выходных переменных задаются лингвистические термы, соответствующие некоторым диапазонам четких значений, описанные с помощью функций принадлежности (ФП)  $\mu_{A_{11}}, \mu_{A_{12}}, \dots, \mu_{A_{1n}}, \mu_{A_{21}}, \mu_{A_{22}}, \dots, \mu_{A_{2n}}, \dots, \mu_{A_{n1}}, \mu_{A_{n2}}, \dots, \mu_{A_{nn}}$ .

Блок фазификации (ФФ) выдает значения ФП посылки  $\mu_{A_1}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*), \mu_{A_2}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*), \dots, \mu_{A_n}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$ , соответствующие конкретным значениям  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*$  входных переменных.

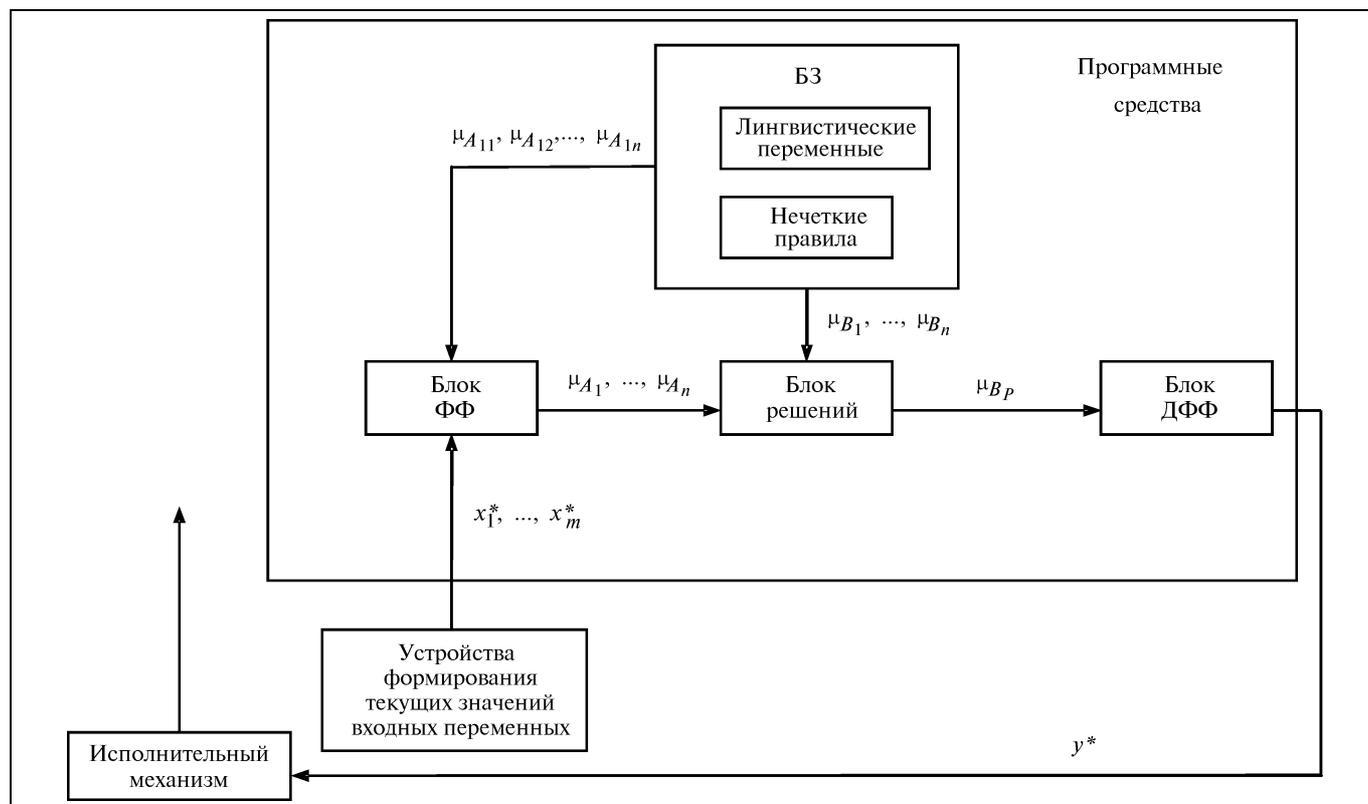


Рис. 1. Схема управления переменной «размер сервера»



Блок решений использует нечеткие условные правила, заложенные в базе знаний (БЗ), для выработки нестрогих логических выводов  $\mu_{B_1^*}(y)$ , ...,  $\mu_{B_n^*}(y)$ . В этом же блоке частные выводы объединяются в общий вывод, которому соответствует результирующая ФП  $\mu_{B_D}(y)$ .

Блок дефаззификации (ДФФ) преобразует [3] нечеткую выходную величину блока решений в четкую величину

$$y^* = \frac{\int y \mu_{B_p}(y) dy}{\int \mu_{B_p}(y) dy},$$

которая используется для управления объектом.

## 2. ОБЩАЯ ПРОЦЕДУРА УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим общую процедуру управления на примере экспертных представлений лингвистических переменных [4, 5]  $N, L, E_c$  и  $\Delta E$  с помощью нескольких термов. Их ФП приведены на рис. 2–5, где:

$$N = \{\text{«мало»}(N_1), \text{«много»}(N_2)\};$$

$$L = \{\text{«короткие»}(L_1), \text{«длинные»}(L_2)\};$$

$$E_c = \{\text{«достаточно малая»}(E_1), \text{«средняя»}(E_2), \text{«достаточно большая»}(E_3)\};$$

$$\Delta E = \{\text{«уменьшить»}(\Delta E_1), \text{«не менять»}(\Delta E_2), \text{«увеличить»}(\Delta E_3)\}.$$

Представленная экспертами база правил в рассматриваемом примере целиком состоит из правил вида:

«(если  $L = \dots$  и  $N = \dots$ ) и (если  $L = \dots$  и  $N = \dots$ ) и  $E_c = \dots$ , то  $\Delta E = \dots$ »; «если  $L = \text{короткие}$  и  $N = \text{мало}$  = «мало коротких»; (например, «(если  $L = \text{«короткие»}$  и  $N = \text{«мало»}$ ) и (если  $L = \text{«длинные»}$  и  $N = \text{«мало»}$ ) и  $E_c = \text{«достаточно большая»}$ , то  $\Delta E = \text{«уменьшить»}$ ). Базу правил удобно представить в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

База правил

$(N \times L)$	$E_1$		$E_2$		$E_3$	
	$(N \times L)$		$(N \times L)$		$(N \times L)$	
	Коротких					
	мало	много	мало	много	мало	много
Длинных						
мало	$\Delta E_3$	$\Delta E_3$	$\Delta E_2$	$\Delta E_2$	$\Delta E_1$	$\Delta E_1$
много	$\Delta E_3$	$\Delta E_3$	$\Delta E_3$	$\Delta E_3$	$\Delta E_2$	$\Delta E_2$

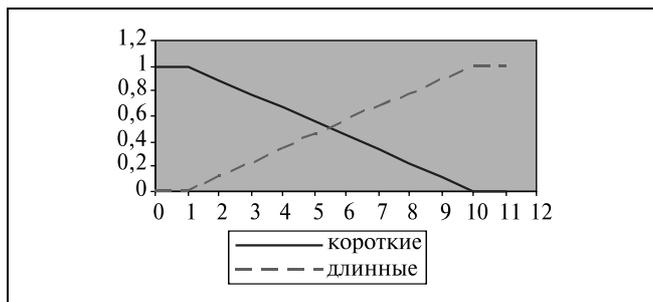


Рис. 2. Функция принадлежности входной переменной «длина аperiodических запросов»  $L$

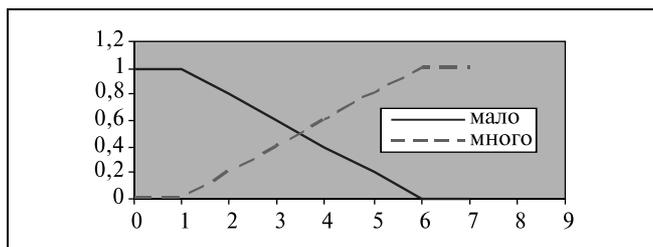


Рис. 3. Функция принадлежности входной переменной «число аperiodических запросов»  $N$

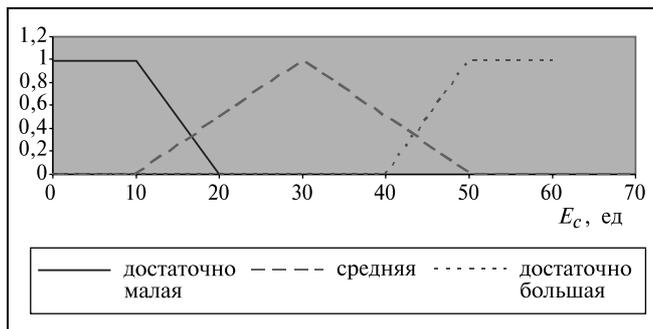


Рис. 4. Функция принадлежности входной переменной «размер сервера»  $E_c$

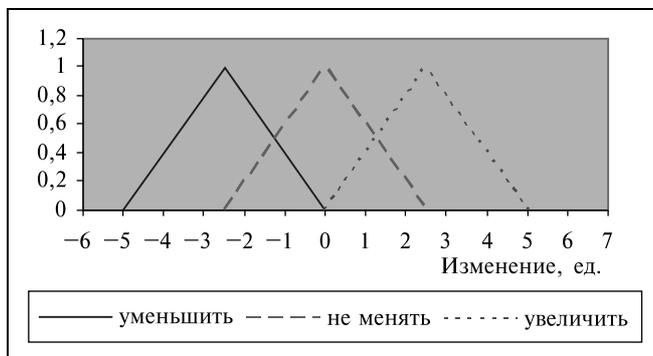


Рис. 5. Функция принадлежности входной переменной «изменение размера сервера»  $\Delta E$

После того, как для всех входных и выходных переменных заданы лингвистические термы, соответствующие некоторым диапазонам четких значений, и сформирована таблица правил на основе условных высказываний, математическую модель системы управления можно считать построенной.

В соответствии с алгоритмом Мамдани [3] протестируем построенную модель по шагам на основе следующих реальных данных:  $E^* = 48$  ед. ( $L_k^* = 2$  ед. и  $N_k^* = 2$  шт.), и ( $L_d^* = 8$  ед. и  $N_d^* = 4$  шт.). Так как значения параметров входного потока соответствуют множествам «мало коротких» и «много длинных», а размер сервера не максимальный, очевидной стратегией управления должно быть определенное увеличение размера выделяемого сервера. Она состоит в следующем.

1. На основании известных соотношений нечеткой логики и с учетом принятых ФП (см. рис. 2–4) проводим ФФ:

$$\begin{aligned} L_1(L_k^*) &= 0, (8); & L_2(L_k^*) &= 0, (1); \\ L_1(L_d^*) &= 0, (2); & L_2(L_d^*) &= 0, (7); \\ N_1(N_k^*) &= 0, (8); & N_2(N_k^*) &= 0, 2; \\ N_1(N_d^*) &= 0, (4); & N_2(N_d^*) &= 0, 6; \\ E_1(E^*) &= 0; & E_2(E^*) &= 0, 1; & E_3(E^*) &= 0, 8. \end{aligned}$$

2. Используя эти фазсифицированные величины, вычисляем значения ограничений ФП правил (табл. 2).

3. Агрегируем правила вывода. Результирующая ФП управляющего воздействия, полученная из рис. 5, показана на рис. 6.

Таблица 2

Ограничения функции принадлежности правил

$(N \times L)$	$E_1$		$E_2$		$E_3$	
	$(N \times L)$		$(N \times L)$		$(N \times L)$	
	Коротких					
	мало	много	мало	много	мало	много
Длинных						
мало	0	0	0,1	0,1	0,(2)	0,(1)
много	0	0	0,1	0,1	0,6	0,(1)

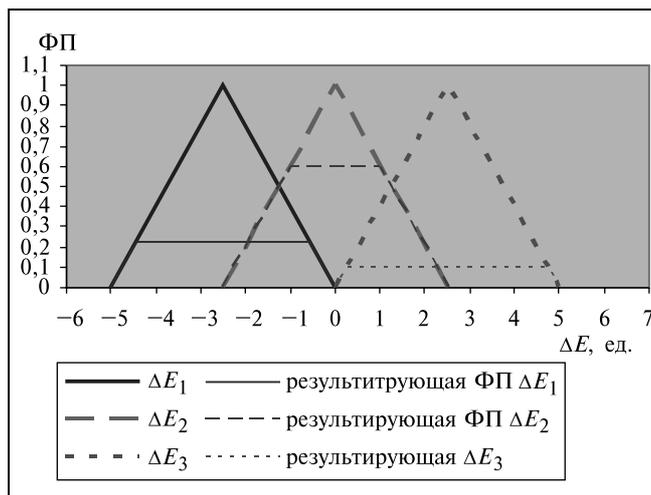


Рис. 6. Результирующая функция принадлежности изменения управляющего воздействия

4. В результате ДФФ получаем  $\Delta E^* = 2,5$  ед., т. е. при данных условиях целесообразно увеличить размер выделяемого сервера на 2,5 ед.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный пример демонстрирует возможности управления процессом формирования прогнозируемого значения размера сервера на основании оценки состояния входного потока запросов с использованием нечетких переменных и последующей их обработкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова С.А., Матушкин Н.Н. Об оптимальных системах реального времени с аperiodическими запросами // Высокие технологии — 2004: Сб. тр. науч.-техн. форума с междунар. участием. — Ижевск: ИЖГТУ, 2004. — Ч. 3. — С. 40–57.
2. Burns A., Bernat G. New Results on Fixed Priority Aperiodic Servers / Real-time Research Group University of York. — York: Heslington, 1999.
3. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — Там же, 1976. — 168 с.
5. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. — М.: Радио и связь, 1982.

☎ (432) 239-18-17, e-mail: Vally-S@yandex.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.



# МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕНИРОВОЧНЫХ УПРАЖНЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНОМ ТРЕНАЖЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ<sup>1</sup>

Е.Л. Кулида

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Предложен метод, позволяющий автоматизировать процесс обучения и проверки знаний обучаемых, а также создавать и редактировать тренировочные упражнения в процессе эксплуатации компьютерного тренажерного комплекса.

## ВВЕДЕНИЕ

Основным средством обучения операторов на компьютерном тренажерном комплексе (КТК) служат тренировочные упражнения. Кроме того, они являются средством накопления опыта инструктора, приобретаемого в процессе компьютерного тренинга, поэтому инструктору необходимо предоставить возможность создания и редактирования тренировочных упражнений.

Для потенциально опасных производств многие технологические процедуры, например, запуск технологических узлов, штатное ведение технологических операций, выход из аварийных ситуаций, жестко регламентированы. Обучаемому необходимо освоить основные регламентированные процедуры, которые должны выполняться в строгом соответствии с должностными инструкциями. Тренировочные упражнения для этого этапа обучения состоят из последовательности шагов, которые известны и должны выполняться в определенном порядке.

В настоящей статье предлагается метод реализации тренировочных упражнений, основанный на разделении их информационных структур от алгоритма автоматического обучения. Создание тренировочных упражнений в виде информационных структур позволяет добавлять новые упражнения и изменять имеющиеся упражнения в процессе эксплуатации КТК посредством соответствующих инструментальных средств. Трудность заключается в том, что ход выполнения трениро-

вочного упражнения существенно зависит от состояния технологического процесса, которое в свою очередь существенно зависит от действий обучаемого. Преодоление этой трудности связано с использованием в информационных структурах тренировочных упражнений функций, характеризующих состояние технологического процесса. Постоянный пересчет этих функций при выполнении упражнения позволяет анализировать достигнутые обучаемым результаты и реализовать алгоритм автоматического обучения.

## 1. РЕЖИМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕНИРОВОЧНЫХ УПРАЖНЕНИЙ

В процессе обучения на рабочем месте обучаемого воссоздается рабочее место оператора, управляющего технологическим процессом. Обучаемый может наблюдать за ходом технологического процесса, «перемещаться» по мнемосхемам технологического процесса, воздействовать на технологический процесс: открывать и закрывать клапаны, включать и выключать устройства и т. д.

В процессе компьютерного тренинга обучаемый должен научиться:

- оценивать состояние контролируемого технологического процесса и распознавать отклонения от нормального функционирования;
- прогнозировать последствия управляющих воздействий и внешних факторов;
- находить причины неисправностей;
- планировать действия по реализации типовых операций и принимать решения при возникновении нестандартных ситуаций.

Для автоматизации процесса обучения и контроля знаний предусматриваются различные режи-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, прект № 06-08-01547-а.

мы выполнения тренировочных упражнений: демонстрационный, когда КТК показывает обучаемому ход выполнения тренировочного упражнения; тренировочный, когда на каждом шаге КТК выдает обучаемому подсказки; режим проверки знаний и режим повторного воспроизведения ранее выполненных упражнений.

Выполнение упражнений в демонстрационном или тренировочном режиме предполагает, что для каждого шага упражнения специалистами-технологами разработана последовательность действий, позволяющая выполнить поставленную задачу. Эту последовательность действий КТК показывает обучаемому (в качестве возможного способа достижения поставленной цели) при выполнении тренировочных упражнений в демонстрационном режиме. В режиме проверки знаний предлагаемая последовательность действий не является обязательной, от обучаемого требуется перейти из исходного состояния технологического процесса в требуемое состояние, соблюдая при этом регламентированную последовательность шагов.

При выполнении упражнений в демонстрационном или тренировочном режиме предполагается выведение на экран большого количества справочной информации для помощи обучаемому. Однако включение такой информации в информационную структуру тренировочного упражнения привело бы к многократному дублированию информации в тех случаях, когда в различных тренировочных упражнениях используются одни и те же технологические узлы или устройства, и затруднило бы формирование новых тренировочных упражнений. Поэтому вся справочная информация, необходимая в процессе выполнения тренировочных упражнений, хранится в информационно-справочной системе КТК. Она включает в себя информацию о технологическом регламенте, об аварийных и нештатных ситуациях, о технологических узлах, инструкции по рабочим местам. В информационно-справочной системе для каждого технологического устройства хранится информация:

- об особенностях запуска в работу, функционирования и остановки;
- об особенностях управления устройством;
- о штатных, предаварийных, аварийных диапазонах изменения технологических параметров, связанных с устройством;
- о возможных неисправностях и путях их устранения;
- о различных графических представлениях устройства, о расположении изображения устройства на мнемосхемах технологического процесса и др.

В процессе обучения по тренировочным упражнениям справочная информация выводится на экран автоматически в демонстрационном режиме, в случае грубых ошибок пользователя, при наруше-

ниях технологического регламента или по запросу обучаемого. Объем информации, предоставляемой пользователю, зависит от режима выполнения тренировочного упражнения.

Для случаев, когда обучаемый успешно (с его точки зрения) выполняет упражнение, но не получает от системы сообщения об успешном завершении выполнения упражнения, и для других спорных случаев предусмотрен режим повторного воспроизведения ранее выполненных упражнений на основе протокола работы КТК. В этом режиме на экран выводится информационное сообщение по завершению каждого шага упражнения. Таким образом, обучаемый легко может понять, какой шаг упражнения не был принят системой, и на основе анализа состояния технологического процесса может сам или с помощью инструктора выяснить, почему это произошло.

## 2. МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕНИРОВОЧНЫХ УПРАЖНЕНИЙ

Основой КТК для обучения операторов, управляющих сложным технологическим процессом, служит математическое моделирование технологического процесса. Для реализации автоматического обучения одновременно должны выполняться программа, реализующая математическое моделирование технологического процесса, и программа автоматического обучения.

Программа автоматического обучения:

- отображает технологический процесс на экране в соответствии с состоянием математической модели технологического процесса и передает информацию об управляющих воздействиях пользователю математической модели;
- оценивает действия обучаемого и отображает учебную и справочную информацию, включая подсказки, информацию об ошибочных действиях, сообщения об успешном завершении тренировочных упражнений и другую информацию в соответствии с выбранным режимом обучения и тренировочным упражнением;
- заносит информацию о процессе обучения в базу данных, протоколирует процесс обучения, автоматически оценивает выполнение тренировочных упражнений.

Реализация алгоритма обучения зависит от состояния моделируемого технологического процесса, а математическое моделирование проводится с учетом управляющих воздействий пользователей, регистрируемых программой автоматического обучения. Для обмена информацией между математической моделью и программой автоматического обучения реализована информационная модель технологического процесса. Схема информационного обмена в процессе обучения представлена на третьей странице обложки.



Информационная модель технологического процесса  $M(t) = ((m_1(t), \dots, m_k(t)))$ , где  $m_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, k$  — параметры, отражающие состояние математической модели в текущий и прошедшие моменты времени, а также информацию об управляющих воздействиях пользователя. Принципиально, что если моделирование начинается при некотором фиксированном состоянии информационной модели, то состояние моделируемого технологического процесса воспроизводится однозначно. Это достигается путем включения в информационную модель истории значений параметров, отражающих динамику моделирования [1, 2].

Заданием точных значений параметров информационной модели можно точно определить состояние технологического процесса, а заданием логических условий для переменных информационной модели определяется допустимый диапазон его состояний.

Предлагаемый метод формирования и реализации алгоритма выполнения тренировочных упражнений базируется на использовании логических функций над параметрами информационной модели. Эти функции формируются на основе информации, имеющейся в информационной структуре тренировочного упражнения, и используются при реализации алгоритма обучения для осуществления связи между состоянием моделируемого процесса и продвижением выполнения тренировочного упражнения.

При формировании информационной структуры тренировочного упражнения должны быть заданы:

- описание исходного состояния моделируемого процесса;
- цель упражнения — результат, который должен быть получен обучаемым;
- описание шагов упражнения — последовательности действий, позволяющей достичь поставленную цель;
- рекомендуемое время выполнения упражнения (для формирования оценки).

Состояние каждого технологического устройства в зависимости от его типа характеризуется определенным набором параметров. Например, состояние химического реактора в момент времени  $t$  характеризуется давлением и температурой в реакторе, весом и уровнем реакционной массы, расходом азота и др. Стадии технологического процесса и технологические рамки штатного функционирования, диапазоны допустимых значений параметров для устройства на каждой стадии определены технологическим регламентом и могут быть заданы в виде логических условий, включающих в себя сравнения параметров информационной модели технологического процесса с известными величинами. Могут быть определены такие логические условия и для совокупности технологических

устройств, образующих узлы технологического процесса.

Логическим условием штатного функционирования подсистемы  $P$  на заданной стадии  $S$  технологического процесса будем называть логическую функцию  $F_P^S((m_1(t), \dots, m_k(t)))$  такую, что  $F_P^S((m_1(t), \dots, m_k(t))) = true$ , если для заданной стадии  $S$  выполняются все регламентированные технологические нормы и все технологические параметры находятся в допустимых пределах,  $F_P^S((m_1(t), \dots, m_k(t))) = false$  в противном случае. Во время проведения той или иной технологической операции постоянной проверкой условий штатного функционирования обеспечивается контроль состояния системы.

Предположим, тренировочное упражнение связано с какой-либо технологической операцией, относящейся к стадии  $S$  технологического процесса. Для реализации автоматического процесса обучения необходима следующая информация:

- начальное состояние информационной модели технологического процесса  $M^* = (m_1^*, \dots, m_k^*)$ , которое загружается в нее в момент  $t_0$  начала выполнения упражнения;
- логическое условие штатного функционирования технологического процесса во время выполнения упражнения

$$F_0((m_1(t), \dots, m_k(t))) = F_1^S((m_1(t), \dots, m_k(t))) \& \dots \\ \dots \& F_p^S((m_1(t), \dots, m_k(t))), \quad (1)$$

где  $p = 1, \dots, P$  — узлы технологического процесса, которые должны функционировать во время проводимой технологической операции;

- логическое условие завершения выполнения  $n$ -го шага тренировочного упражнения  $F_n((m_1(t), \dots, m_k(t)))$ ,  $n = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число шагов упражнения.
- цель упражнения, которая задается логическим условием завершения выполнения последнего шага упражнения  $F_N((m_1(t), \dots, m_k(t)))$ .

Для тренировочного упражнения, информационная структура которого включает в себя эти элементы, реализация алгоритма его выполнения достаточно очевидна (подробности реализации различных режимов выполнения тренировочных упражнений рассматривать не будем):

1) перед началом выполнения тренировочного упражнения в информационную модель технологического процесса загружается начальное состояние  $M(t_0) = (m_1(t_0) = m_1^*, \dots, m_k(t_0) = m_k^*)$ ;

2) на каждом такте функционирования КТК для текущего  $n$ -го шага тренировочного упражнения вычисляется функция завершения шага  $F_n((m_1(t), \dots, m_k(t)))$ ,  $n = 1, \dots, N$  (параллельно рабо-

тающий блок математического моделирования технологического процесса постоянно обновляет значения параметров информационной модели технологического процесса  $m_1(t), \dots, m_k(t)$ ;

3) в момент времени  $t_n$  такой, что:

$$F_n((m_1(t), \dots, m_k(t))) = true \& F_n((m_1(t), \dots, m_k(t))) = false \forall t: t_{n-1} \leq t < t_n,$$

происходит переход к  $(n + 1)$ -му шагу упражнения,  $n = 1, \dots, N - 1$ ;

4) упражнение считается успешно выполненным в момент времени  $t^*$  такой, что:

$$F_N((m_1(t^*), \dots, m_k(t^*))) = true \& F_N((m_1(t), \dots, m_k(t))) = false \forall t: t_{N-1} \leq t < t^*;$$

в этот момент КТК формирует оценку за выполненное упражнение, информация о выполнении протоколируется и упражнение завершается.

Обучаемый может выполнять любые действия, но переход к следующему шагу тренировочного упражнения произойдет в том и только том случае, если будет получено такое состояние технологического процесса, при котором выполнится логическое условие завершения предыдущего шага. В режиме проверки знаний переход от шага к шагу не заметен для обучаемого, однако для успешного завершения выполнения упражнения система должна зафиксировать последовательное завершение выполнения всех шагов упражнения. Если обучаемому не удается завершить выполнение тренировочного упражнения в режиме проверки знаний вследствие неправильных действий, то он может сначала выполнить это упражнение в демонстрационном или тренировочном режиме, а потом снова вернуться к режиму проверки знаний.

На практике задавать логическое условие завершения выполнения для каждого шага в виде функции, зависящей от переменных информационной модели, было бы слишком обременительно ввиду большого числа параметров информационной модели. Однако на каждом шаге тренировочного упражнения изменяется небольшое число параметров и требуется достижение ими точно определенных значений. Имея такую информацию, условия завершения шагов упражнений можно формировать автоматически.

Таким образом, предлагаемый метод реализации тренировочных упражнений заключается в:

1) отделении информационной структуры тренировочного упражнения от алгоритма автоматического обучения;

2) формировании информационной структуры упражнения, в которой для каждого шага определяются контрольные параметры, значения которых должны измениться по сравнению с предыдущим шагом, и их новые значения;

3) автоматическом формировании логических условий завершения шагов на основе информаци-

онной структуры тренировочного упражнения: для первого шага — из логического условия штатного функционирования (1), для следующих шагов — из логического условия завершения предыдущего шага;

4) пересчете логических условий завершения шагов упражнения для автоматического перехода к очередному шагу в процессе выполнения упражнения.

Условие штатного функционирования всех вспомогательных систем задается в логическом условии штатного функционирования (1) и, следовательно, будет отражено в условиях завершения всех шагов упражнения. Таким образом, возникновение неполадок в любой части системы не позволит перейти к следующему шагу тренировочного упражнения или закончить выполнение упражнения до тех пор, пока неполадки не будут устранены.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод был применен в компьютерном тренажерном комплексе для обучения операторов, управляющих технологическим процессом уничтожения химического оружия [3], разработанном для учебного центра ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологий» и Саратовского военного института радиационной, химической и биологической защиты.

Метод позволяет автоматизировать обучение для хорошо изученных технологических операций, когда можно сформировать функцию завершения каждого шага создаваемого тренировочного упражнения. В менее изученных случаях и экспериментах с разными вариантами управления обучаемым необходима помощь инструктора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Модели компьютерного тренажерного комплекса для обучения операторов объекта уничтожения химического оружия // Проблемы управления. — 2005. — № 6. — С. 69–72.
2. Computerized simulator for training the operators of facilities for destruction of chemical weapons / V.G. Lebedev, Yu.S. Legovich, E.L. Kulida and D.B. Rozhdestvenskii // 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2006). — Saint-Etienne, 2006. — Vol. 2. — P. 771–776.
3. Компьютерный тренажерный комплекс для обучения персонала центрального пульта управления объекта уничтожения химического оружия / А.Ю. Уткин, В.Г. Лебедев, Н.А. Костикова и др. // Проблемы управления. — 2005. — № 1. — С. 56–61.

☎ (495) 334-92-49, e-mail: lenak@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Э.Л. Ицковичем. □



# ИНФОРМАЦИОННО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ<sup>1</sup>

Ю.Л. Муромцев, И.В. Тюрин

*Тамбовский государственный технический университет*

Освещены проблемы оптимального управления энергоемкими аппаратами и основные пути их решения. Рассмотрена созданная инструментальная среда для решения комплекса задач оптимального управления промышленными объектами. Приведены примеры применения разработанных методов на производстве.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность задач ресурсосбережения определяется современными отечественными и международными требованиями к экономичности и экологичности промышленного оборудования. Требуется переход на новые, в том числе, интеллектуальные и энергосберегающие технологии, внедрение концепции «бережливого производства». Необходимость решения таких задач определяет, в частности, введенный 01.09.2000 г. ГОСТ Р 51380—99, регламентирующий нормативные значения показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции производственно-технического назначения и бытового потребления на стадиях ее жизненного цикла.

В странах Европейского сообщества ведутся работы в рамках проекта «Энергетическая эффективность-XXI» (EE-21) Европейской экономической комиссии ООН под эгидой Комитета по устойчивой энергетике для решения проблем энергоэффективности. В условиях рыночной экономики материальные и невозобновляемые энергетические потоки на входе в социально-экономическую систему учитываются ценами, выражаю-

щими лишь затраты на извлечение природных богатств без учета реальной ценности добываемого и потребляемого ресурса. Цены произведенного товара не отражают в себе губительных последствий воздействия на экологическую систему энергетических затрат и потоков отходов в виде твердых, жидких и газообразных сред. Существует предел, выше которого нельзя использовать природные ресурсы при производстве продукции.

Для обеспечения выпуска отечественной промышленностью конкурентоспособных товаров необходимы комплексные исследования существующих технологических процессов, по результатам которых принимаются меры по реинжинирингу производства. Особое внимание при анализе промышленных ситуаций следует уделять в случае производства продукции, эффективно функционирующей в критических и опасных ситуациях.

## 1. ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

На мировом рынке используются десятки пакетов программ CAD, CAM, CAE (WinCC, Trace Mode, RSView и др.) автоматизированного проектирования алгоритмического обеспечения систем управления. Однако применение таких многофункциональных информационно-вычислительных сред не дает возможности визуализировать ход и результаты решения задач обеспечения энергоэффективности, что важно для проектировщи-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 07-08-12218-офи «Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими многомерными объектами»).

ков оптимальных систем управления. Эти программные продукты не позволяют учитывать важные для практики ограничения на фазовые координаты, лимит энергии, запас ресурсов, скорость изменения управления и др. В них также не предусмотрено решение важных для проектировщика обратных задач проектирования систем, связанных с изменением исходных данных систем управления для обеспечения требуемого запаса устойчивости, поддержания значения функционала в заданных границах, оценки рисков при переходе на оптимальные режимы и т. п.

Опыт использования оптимального управления тепловыми аппаратами показал, что экономия энергозатрат для технологических печей составляет 15–17 %, для электрических нагревателей жидкости — до 20 %. Благодаря этому не только снижаются затраты электроэнергии, но и повышается долговечность оборудования [1].

К настоящему времени созданы программные модули для автоматизированного проектирования алгоритмического обеспечения микропроцессорных энергосберегающих устройств, действующие макеты самих устройств, выполняющих функции интеллектуальных бортовых контроллеров (Embedded System). Новый математический аппарат решения задач энергосберегающего управления при проектировании оптимальных систем управления технологическими объектами, а также его реализация дешевыми малогабаритными с широкими функциональными возможностями контроллерами нового поколения создают реальную основу для их широкого внедрения на технологических установках во всех энергоемких отраслях промышленности и транспорте.

Эффект энергосбережения достигается благодаря:

- оптимальному ведению динамических режимов при всех состояниях функционирования объекта, т. е. в случае изменения его свойств или условий задачи оперативно (в реальном времени) находится новое ее решение и реализуются энергосберегающие управляющие воздействия для новой ситуации;

- применению оптимальной стратегии функционирования системы управления для каждой конкретной ситуации;

- замене обычных автоматических регуляторов интеллектуальными энергосберегающими, которые устраняют значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения с минимумом затрат энергии (расхода топлива);

- сокращению на порядок временных затрат на проектирование систем автоматизации и внесению в них изменений при сопровождении в процессе эксплуатации;

- применению созданных интеллектуальных телекоммуникационных средств для выполнения работ по проектированию систем промышленной автоматизации в режимах удаленного доступа и группового ведения проекта;

- принятию оптимальных проектных и управленческих решений на всех этапах разработки и сопровождения при эксплуатации систем управления.

---

## 2. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА

---

Основу информационно-инструментальной среды разработки алгоритмического обеспечения энергосберегающего управления составляет экспертная система энергосберегающего управления (ЭСЭУ) [2, 3]. В ней реализована методология построения гибридных экспертных систем, предназначенных для решения задач управления энергоемкими объектами (теплообменными аппаратами и установками, машинами с электродвигателями, транспортными средствами и др.).

В базе знаний экспертной системы, кроме теоретических методов оптимального энергосберегающего управления, используются знания экспертов. Предусматривается пополнение результатами реальной эксплуатации базы знаний системы. Большое значение при создании баз знаний придается развитию концепции наследования и формированию принципов комплексирования. Концепция наследования обеспечивает значительное ускорение процесса создания новых и совершенствование существующих фреймов базы знаний в направлениях расширения множества используемых моделей динамики; возможных ограничений на траектории фазовых координат и скорость изменения управлений; учета лимитов энергии, запаса топлива и др., возникающих при реальной эксплуатации систем; применения новых стратегий реализации энергосберегающего управления. Задачи комплексирования связаны с повышением точности или робастности систем ресурсосберегающего управления путем использования информации, полученной на основе аналитических методов оптимального управления, знаний экспертов и накопленных результатов реальной эксплуатации систем управления. Благодаря сформулированной концепции наследования и применению принципов комплексирования формируется единое информационно-вычислительное пространство для проектирования систем энергосберегающего управления (СЭУ).

В автоматизированном режиме с помощью ЭСЭУ решаются прямые и обратные задачи энергосберегающего управления. Это требует применения методов, которые на основе значительного



снижения размерности массивов переменных и параметров, участвующих в решении задач, позволяют визуализировать ход и полученные результаты для проектировщика систем управления.

Для решения прямых и обратных задач энергосберегающего управления, наряду с известными методами (принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование, аналитическое конструирование оптимальных регуляторов, представление знаний фреймами в виде продукционных правил и др.), широко применяются новые методы и подходы. К ним относятся:

- полный анализ задачи оптимального управления на множестве состояний функционирования (комплексно учитываются возможные ограничения и условия при реальной эксплуатации); метод синтезирующих переменных (сокращается размерность массива исходных данных задачи управления);
- оперативное определение вида функции оптимального энергосберегающего управления и расчет ее параметров, траектории изменения фазовых координат, эффекта энергосбережения и оценку работоспособности алгоритма управления при изменении исходных данных;
- комбинированный метод синтеза оптимального управления объектами (для объектов, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями с разрывной правой частью);
- концепция дестабилизационного управления объектами (учитывается изменение их возможной производительности);
- принципы наследования (при разработке новых фреймов базы знаний);
- принципы комплексирования (для совместного использования информации, получаемой методами оптимального управления, на основе знаний экспертов и анализа накопленных фактов).

Некоторые из упомянутых методов опубликованы в рецензируемых изданиях, отличающихся оригинальностью, их аналоги неизвестны [4—7].

Отличительные особенности разработанной ЭСЭУ состоят в уникальной базе знаний и оригинальном программном обеспечении, позволяющем оперативно переходить от исследования одной задачи оптимального энергосберегающего управления к другой при решении широкого круга задач анализа и синтеза оптимальных управляющих воздействий на множестве состояний функционирования энергоемких промышленных объектов. Созданная ЭСЭУ позволяет:

— решать задач анализа и синтеза оптимального управления объектами, динамические режимы которых описываются дифференциальными уравнениями не выше третьего порядка, при минимизируемых функционалах — затратах энергии, расхода топлива, времени управления и др., с учетом

выполнения интегральных ограничений на лимит энергии или запас топлива;

— определять вид и выполнять расчет параметров энергосберегающего управления, реализуемого программной или позиционной стратегиями;

— решать комплекс задач идентификации моделей динамики объектов управления, в том числе в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью;

— разрабатывать программное обеспечение для микропроцессорных управляющих устройств;

— решать прямые и обратные задачи проектирования алгоритмического обеспечения систем оптимального энергосберегающего управления.

Система предоставляет:

— дистанционный доступ к интегрированной базе данных для группового ведения проектных работ в рамках виртуального предприятия;

— привлечение экспертов через Интернет;

— широкий набор методов ранжирования альтернативных вариантов, парных сравнений, оптимизации по Парето, Байеса — Лапласа, теории игр и др.;

— проведение эксперимента и предварительную обработку данных;

— определение закона распределения возмущающих воздействий;

— визуализацию процессов идентификации.

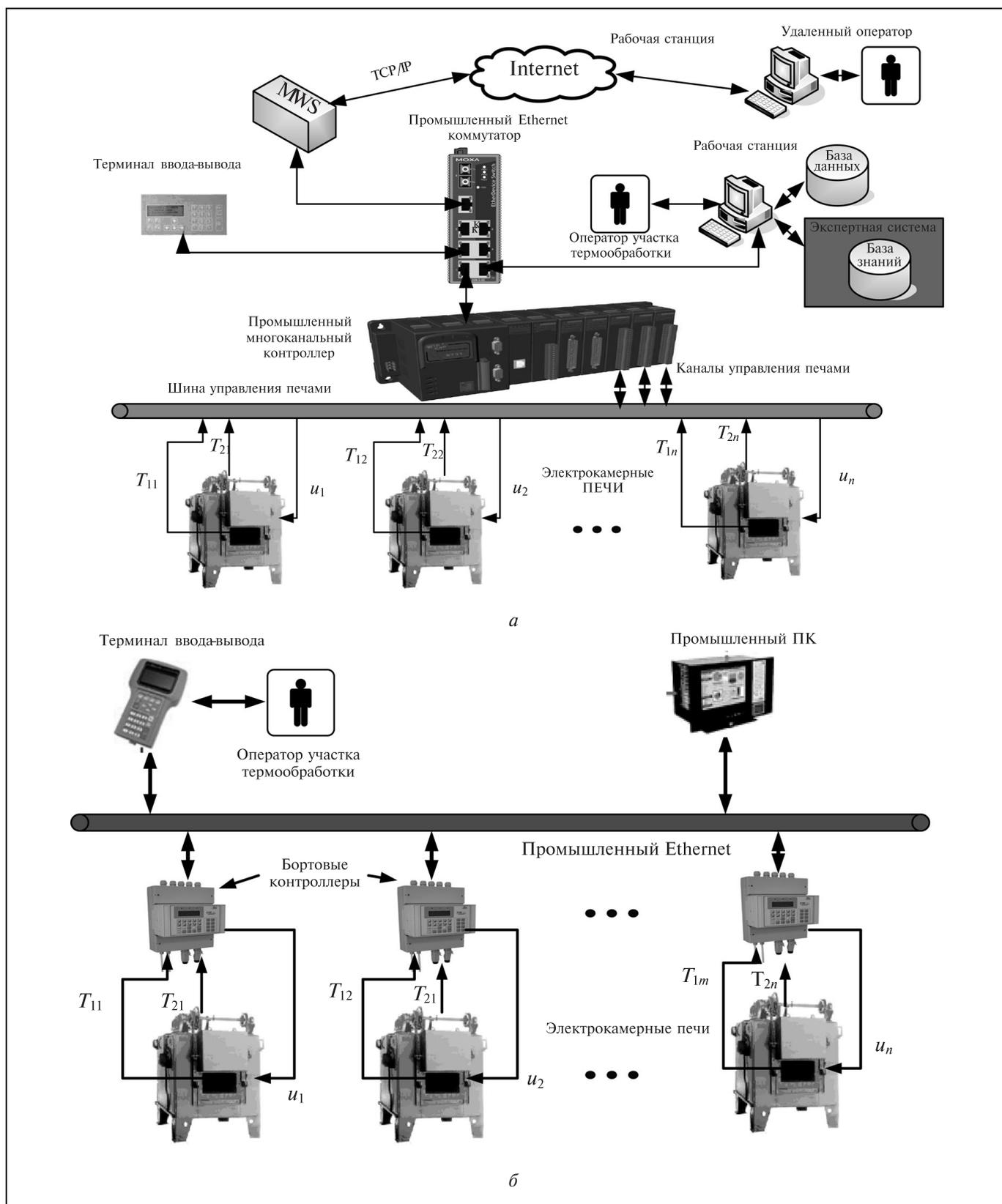
Оригинальный метод анализа и синтеза оптимального управления дает возможность отображать на экране дисплея обобщенный геометрический образ множества возможных решений для конкретных классов математических моделей и исходных данных. С фрагментом интерфейса модуля ЭСЭУ можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://www.iptop.net/di> или <http://crems.jesby.tstu.ru/di>.

С помощью созданной ЭСЭУ разработано алгоритмическое и программное обеспечение СЭУ для установок термообработки магнитопроводов, смесительных машин по производству полимерных материалов, вулканизаторов, электрокамерных печей, многозонных электропечей, многосекционных сушилок вальце-ленточного типа и др.

### 3. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ СЭУ

На рис. 1 представлены два варианта технической реализации СЭУ для группы электрокамерных печей.

В системе предусмотрена регистрация температуры внутри камеры печи и снаружи, решение задач идентификации модели динамики и синтеза в реальном времени энергосберегающих управляющих воздействий. В структуру СЭУ входят Miniwebserver (MWS), промышленный контроллер, промышленный коммутатор Ethernet, терми-



**Рис. 1. Схема реализации СЭУ группой электрокамерных печей:**

*a* — с многоканальным контроллером WINCON-8000; *б* — с бортовым контроллером NZ-6000;  $T_{11}, \dots, T_{1n}$  и  $T_{21}, \dots, T_{2n}$  — температуры внутри и снаружи камеры печи;  $u_1, \dots, u_n$  — управляющие воздействия

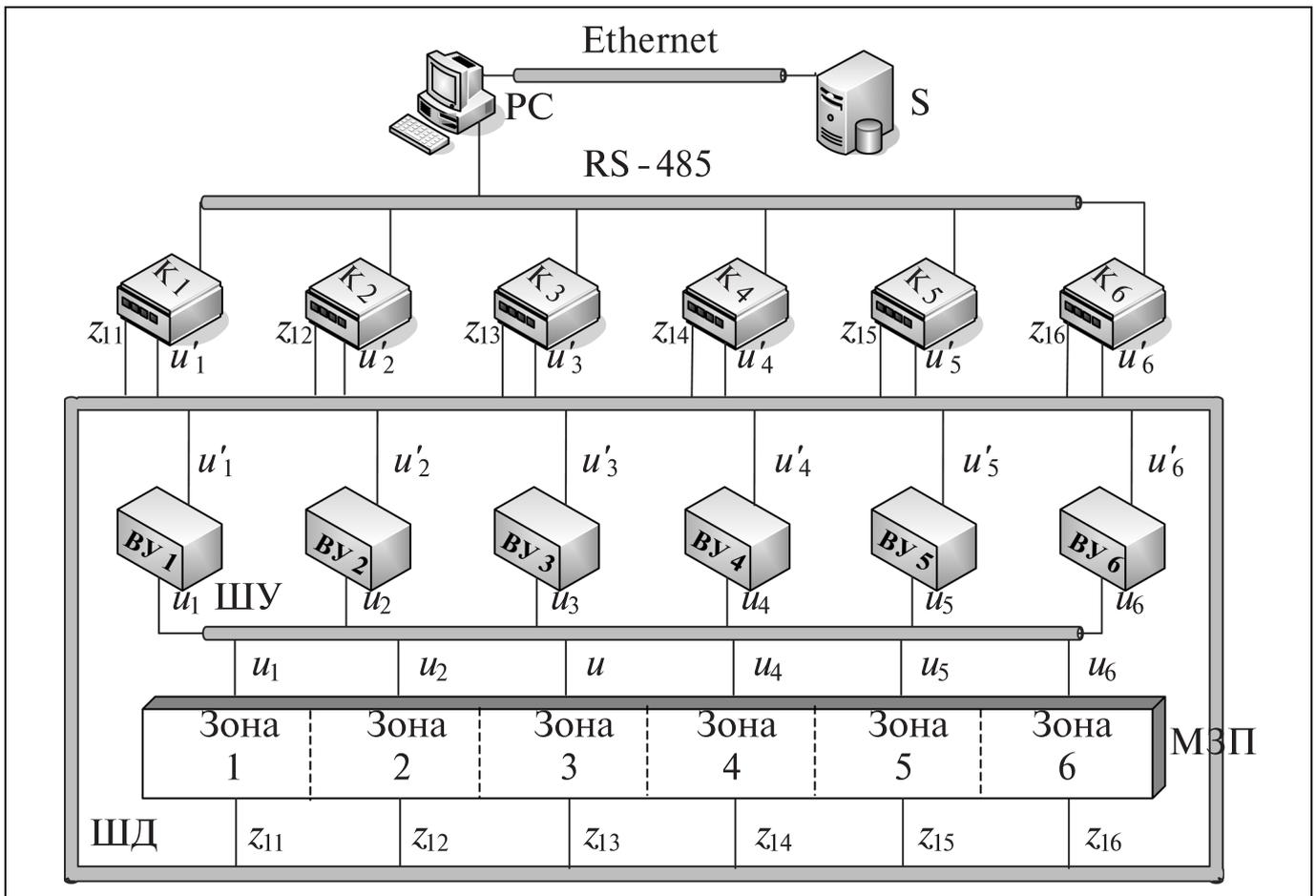


Рис. 2. Техническая реализация СЭУ многозонной печи

нал ввода-вывода, рабочая станция. Для управления печами применяется обобщенный алгоритм, в котором сочетаются методы синтезирующих переменных и нечеткой логики. Предусмотрен режим адаптации с автоматической коррекцией параметров модели и функций принадлежности нечетких множеств, которые по окончании режима адаптации записываются в память контроллера для последующего использования [8].

В качестве примера на рис. 2 приведена структура системы управления многозонными электрическими печами (МЗП).

Система управления печью имеет двухуровневую структуру [9]. На верхнем уровне располагаются управляющая ЭВМ *PC* и сервер *S* с базой знаний системы оптимального управления, взаимодействующие между собой в рамках сети Ethernet, а на нижнем — контроллеры *K1* — *K6* с локальными выходными устройствами *ВУ1* — *ВУ6* управления зонами печи.

Локальные системы управления реализованы на шести измерителях-регуляторах температуры OWEN TRM201. Связь контроллеров с ЭВМ осу-

ществляется с помощью двунаправленного интерфейса RS-485, в качестве программного обеспечения используется SCADA-система OWEN Process Manager. На входы контроллеров *K1* — *K6* по шине данных ШД передается информация о значениях фазовых координат  $z_{11}$ — $z_{16}$  в зонах, а с выходов снимаются сигналы  $u'_1$ — $u'_6$ , необходимые для работы выходных устройств *ВУ1* — *ВУ6*. На дисплеях контроллеров отображается информация о значениях фазовых координат в зонах, задаваемые значения температурных режимов, параметры настроек регулирования и др. На выходах устройств управления *УУ1* — *УУ6* формируются управляющие воздействия  $u_1$ — $u_6$ , которые по шине управления ШУ подаются на нагревательные элементы соответствующих зон печи.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования и результаты практической реализации СЭУ показывают, что рассмотренная многофункциональная информацион-

но-инструментальная среда, охватывающая все этапы проектирования СЭУ, позволяет:

- сократить сроки разработки СЭУ;
- обеспечить поддержку группового проектирования, в том числе в режиме удаленного доступа;
- использовать опыт предшествующих наработок (благодаря применению принципов наследования и постоянного пополнения базы знаний);
- снизить стоимость проектных работ.

Разработанные СЭУ внедрены на ряде промышленных предприятий г. Тамбова и области, результаты исследований используются в учебном процессе Тамбовского государственного технического университета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Альтгаузен А.П.* Применение электронагрева и повышение его эффективности. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 128 с.
2. *Муромцев Д.Ю.* и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 950464 «Экспертная система "Энергосберегающее управление динамическими объектами" (EXPSYS)». Зарегистрировано РосАПО 19.12.95.
3. *Муромцев Ю.Л., Орлова Л.П., Капитонов И.Е.* Экспертная система «Энергосберегающее управление динамическими объектами» // Вестник ТГТУ. — 1995. — Т. 1, № 3 — 4. — С. 221—226.
4. *Муромцев Д.Ю., Муромцев Ю.Л., Орлова Л.П.* Синтез энергосберегающего управления многостадийными процессами комбинированным методом // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 3. — С. 169—178.
5. *Муромцев Д.Ю.* Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами. — Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Нобелистика, 2005. — 202 с.
6. *Тюрин И.В.* Анализ и оперативный синтез энергосберегающего управления многозонными электрическими печами // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 3. — С. 12—14.
7. *Тюрин И.В., Яшин Е.Н.* Оптимальное управление температурным профилем сложных объектов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2006. — № 9. — С. 1—4.
8. *Белусов О.А.* Автоматизированная система энергосберегающего управления электрокамерными печами // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 5. — С. 32—34.
9. *Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В.* Энергосберегающее управление сложными объектами // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2005. — № 11. — С. 24—28.

☎ (4752) 63-94-17,  
e-mail: [crems@crems.jesby.tstu.ru](mailto:crems@crems.jesby.tstu.ru), [tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru](mailto:tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
А.С. Манделем. □

## МЕРОПРИЯТИЯ IFAC — Международной федерации по автоматическому управлению

Мероприятие	Дата	Место проведения
IFAC SFI, SUT, ONR, MI Workshop Navigation, Guidance & Control of Underwater Vehicles (NGCUV2008)	April 08—10, 2008	Killaloe, Co Clare, IRELAND
INSTICC IFAC Conference Informatics in control, Automation and Robotics — ICINCO 2008	May 11—15, 2008	Funchal, Madeira, PORTUGAL
IEEE IFAC Workshop Variable Structure Systems — VSS 2008	June 08—10, 2008	Antalya, TURKEY
AACC IFAC Conference American Control Conference ACC 2008 — in cooperation with IFAC	June 12—14, 2008	Seattle, USA
IFAC Congress World Congress	July 06—11, 2008	Seoul, KOREA
EWICS IFAC Conference Computer Safety, Reliability and Security — SAFECOMP 2008	September 22—24, 2008	Newcastle, UNITED KINGDOM
IFAC IFIP Workshop Intelligent Manufacturing Systems (9th) — IMS	October 09—10, 2008	Szczecin, POLAND
IFAC Çankaya University, Ankara, Workshop Fractional Differentiation and its Applications — FDA 08	November 05—07, 2008	Ankara, TURKEY
IFAC Symposium Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes — SAFEPROCESS	June 30—July 03, 2009	Barcelona, SPAIN
IFAC Symposium Identification and System Parameter Estimation — SYSID'09 (15th)	July 06—08, 2009	St. Malo, FRANCE
IFAC Symposium Advanced Control of Chemical Processes — ADCHEM	July 12—15, 2009	Istanbul, TURKEY
IFAC Symposium Robot Control, SYROCO 2009 — 9th	September 10—12, 2009	Gifu, JAPAN
IFAC Symposium Automation in Mining, Mineral and Metal Processing 13th	August 02—04, 2010	Cape Town, SOUTH AFRICA
IFAC Symposium Nonlinear Control Systems NOLCOS 2010	September 01—03, 2010	Bologna, ITALY

Дополнительную информацию см. на сайте <http://www.ifac-control.org/>

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЛЕГКИХ<sup>1</sup>

Н.С. Безруков<sup>(1)</sup>, Е.Л. Еремин<sup>(2)</sup>, Ю.М. Перельман<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания СО РАМН, г. Благовещенск;

<sup>(2)</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Предложена автоматизированная система диагностики бронхиальной астмы и хронической обструктивной болезни легких по показателям изокапнической гипервентиляции холодным воздухом и реоэнцефалографии. Система реализована на основе нейро-нечеткой сети.

## ВВЕДЕНИЕ

Компьютерные системы диагностики развиваются в двух основных направлениях [1]: по пути создания экспресс-систем, основанных на обработке опросников, и по пути создания систем на базе алгоритмов обработки медицинской информации, которая представляется, как правило, в виде результатов инструментальных обследований пациента.

Перед экспертом-медиком встает проблема поиска нужной информации и выбора алгоритмов извлечения знаний из нее для решения задачи диагностики. При анализе «вручную» большого количества информации в поисках нужной врачи теряют время, необходимое для оперативной медицинской помощи [2].

Современные способы автоматизированного извлечения знаний непосредственно из исходных данных отчасти способны снять остроту указанной проблемы. Тем более, что они уже успешно применяются для анализа рынка, в маркетинге и дру-

гих бизнес-приложениях [3]. Однако в области медицины методы интеллектуальной поддержки, основанные на компьютерной обработке и анализе данных, применяются пока недостаточно. Между тем автоматизированный анализ информации позволяет решать ряд медицинских задач, связанных, в частности, со стратегией лечения больного (относительно цены и качества), равномерной загрузкой объектов медицинского обслуживания (поликлиник, лабораторий, диагностических центров), а в особенности — с диагностикой заболеваний.

Актуальность задачи диагностики заболеваний, имеющих сходную симптоматику, подтверждается наличием различных программ. Например, одно из направлений федеральной целевой программы «Развитие пульмонологической службы России на 2002—2007 годы» состоит в разработке и внедрении в практическое здравоохранение России методов ранней диагностики таких заболеваний, как бронхиальная астма (БА) и хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ), а также выявления ошибок их диагностики. Решать данную проблему предлагается мультидисциплинарным объединением знаний из различных направлений медицины.

## 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бронхиальная астма, наряду с ХОБЛ, относится к числу наиболее распространенных хронических заболеваний органов дыхания, она встречается бо-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках программы «Системный анализ и моделирование влияния экологических и социальных факторов на здоровье населения Дальневосточного региона на основе применения современных информационных технологий с целью прогнозирования и разработки систем принятия управленческих решений в социальной сфере для обеспечения национальной безопасности», утвержденной постановлением Президиума ДВО РАН №147 от 15 декабря 2005 г.

лее чем у 5 % населения, варьируя в различных регионах мира от 1 до 30 %. Данные официальной статистики относительно низкой распространенности заболеваний легких в России (БА выявлена у 1–2 % населения страны) не отражают истинной картины. Проведенные в последние годы эпидемиологические исследования в Москве, Новосибирске и других городах страны свидетельствуют о наличии симптомов БА у 5–7 % населения [4].

Основная причина гиподиагностики обусловлена длительным существованием взглядами на БА как заболевание, обязательным проявлением которого является приступ экспираторного удушья. Другие симптомы болезни (преходящий дыхательный дискомфорт, затруднение дыхания на выдохе, приступообразный кашель, сухие, преимущественно экспираторные дистантные хрипы) расценивались как проявления ХОБЛ или предастмы. Такое представление неизбежно сужало круг больных БА, усложняло диагностику и препятствовало адекватному лечению. Как следствие — преобладание тяжелых форм заболевания, высокий процент выхода на инвалидность, низкое качество жизни больных и связанное с этим бремя, ложащееся на семью больного и общество в целом.

Фармако-эпидемиологические исследования [4], проведенные в России, свидетельствуют о значительном несоответствии между научно-обоснованными рекомендациями и практическим положением дел в лечении этой категории больных. Поэтому актуальна задача дальнейших эпидемиологических исследований заболеваний легких в различных регионах страны и последующая разработка на их основе методов диагностики БА и ХОБЛ.

Проведенное в Дальневосточном научном центре физиологии и патологии дыхания СО РАМН исследование биоэлектрической активности головного мозга и церебральной гемодинамики у больных БА и ХОБЛ выявило отклонения электроэнцефалографической и реоэнцефалографической картины по сравнению с контрольной группой практически здоровых лиц. Была выдвинута гипотеза о возможности диагностики БА, используя информацию о параметрах реоэнцефалограммы (РЭГ). В исследовании принимали участие группа здоровых людей и группы больных БА легкой (БА1) и средней степени тяжести (БА2).

Реоэнцефалография — это метод исследования пульсового кровенаполнения тканей головного мозга, основанный на способности организма изменять сопротивление переменному току высокой частоты в зависимости от количества протекающей через него крови [5]. Реограмма отражает

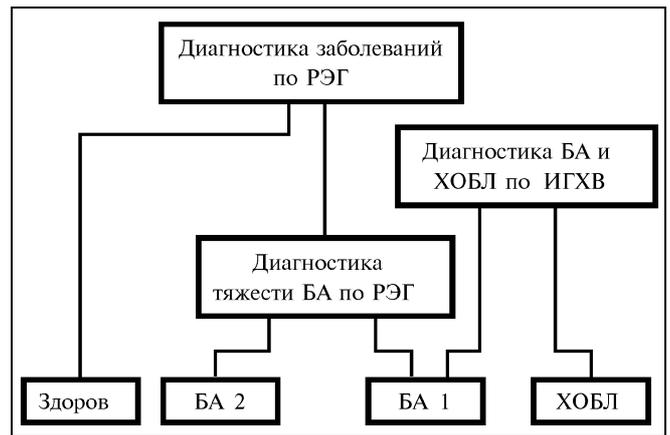


Рис. 1. Схема диагностики заболеваний легких

комплексное сопротивление живых тканей. Реографическое исследование дает 28 диагностических показателей, анализ которых позволит принимать решение о состоянии пациента.

Была исследована также реакция легких на изоканническую гипервентиляцию холодным воздухом (ИГХВ) у больных БА и больных ХОБЛ легкой степени тяжести. Больным со средней степенью тяжести указанных заболеваний ИГХВ не проводилась в связи с принятыми ограничениями на применение бронхопровокационных проб.

В основе бронхоспастической реакции на ИГХВ лежит рефлекторное сокращение гладкой мускулатуры дыхательных путей под влиянием раздражения холодовых рецепторов гортани [6]. Для усиления охлаждающего эффекта воздуха дыхание во время пробы осуществляется в форсированном режиме. Реакция дыхательных путей на охлаждение оценивается через 1 мин после проведения пробы по изменению четырех диагностических показателей.

Предлагается следующая схема диагностики заболеваний легких (рис. 1), состоящая из трех подсистем. Диагностика по РЭГ обнаруживает заболевание у обследуемого, причем данная подсистема позволяет искать болезнь в режиме скрининга при массовом обследовании, так как отсутствуют ограничения на ее применение. В случае обнаружения заболевания диагностика по ИГХВ позволяет определить вид болезни — БА или ХОБЛ. Наконец, если известно, что у пациента БА, то подсистема диагностики по РЭГ позволит более точно дифференцировать тяжесть болезни.

Данная схема диагностики была реализована в автоматизированной системе диагностики заболеваний легких (АСДЗЛ).

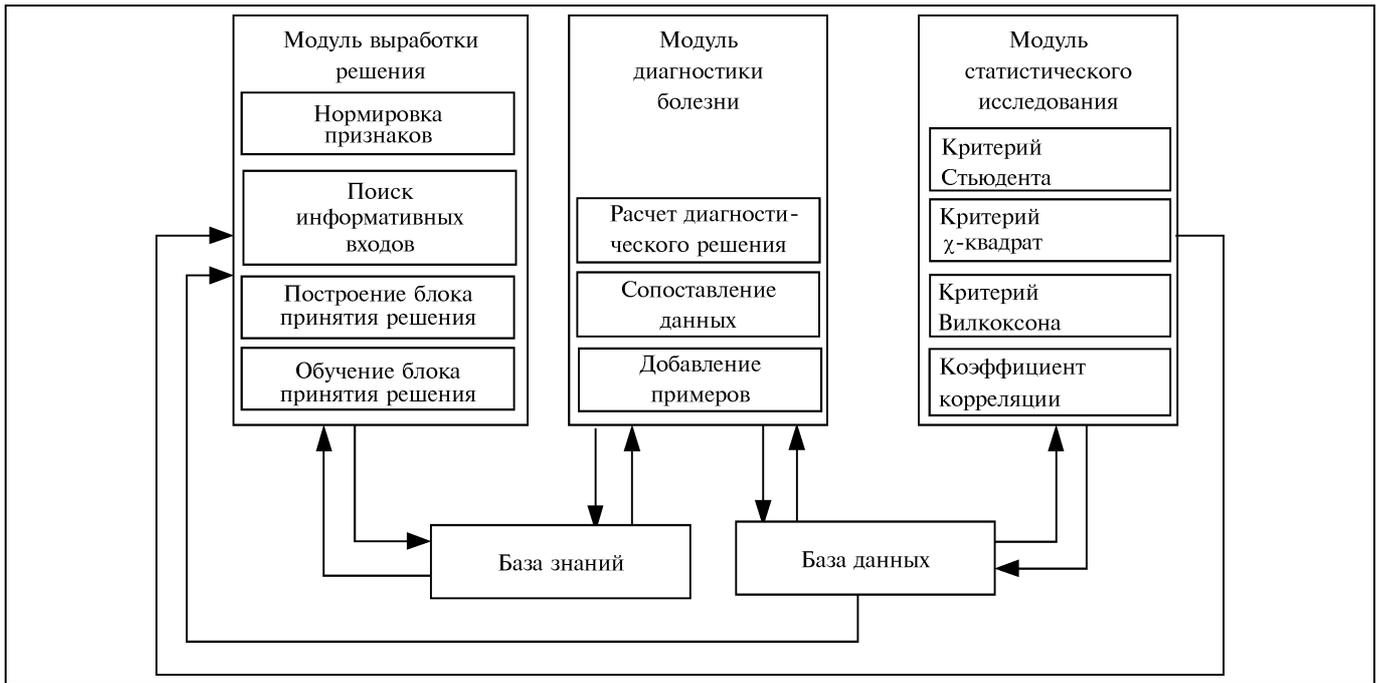


Рис. 2. Структура автоматизированной системы диагностики заболеваний легких

## 2. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЛЕГКИХ

Предлагаемая структура АСДЗЛ (рис. 2) состоит из модулей, позволяющих:

- строить подсистемы диагностики;
- диагностировать болезни;
- проводить статистические исследования.

Модули работают с базой данных, где хранятся результаты проведенных исследований, и базой знаний, в которой находятся подсистемы диагностики.

Основная функция *модуля диагностики* болезни состоит в расчете диагностического решения о возможной болезни пациента, для чего модуль использует подсистемы диагностики и априорно определенные данные. Он позволяет дополнять подсистему по ходу работы новыми примерами и экспортировать их в базу данных.

Функция *модуля выработки решения* заключается в конкретизации структуры вывода диагностического решения с последующим обучением. Структура вывода, в зависимости от начальных условий (числа диагностических признаков и числа обучающих примеров), определяется алгоритмами, описанными в работах [7–9].

При построении структуры вывода диагностического решения необходимо решить три подзадачи: нормировать признаки к единому диапазону и к равномерному распределению; произвести по-

иск информативных входов; построить блок принятия решения.

Нормировка признаков осуществляется с помощью экспоненциальной функции и функционала энтропии по алгоритму, представленному в работе [7]. Поиск информативных входов производится на основе метода независимых компонент, который позволяет обнаруживать скрытые факторы, лежащие в основе набора случайных величин, измерений или сигналов [8]. Подробно задача поиска рассмотрена в Приложении. Блок принятия решения строится на основе каскадной нейро-нечеткой сети по алгоритму, представленному в работе [9]. Достоинство предлагаемой каскадной нейро-нечеткой сети — меньшее по сравнению с общепринятой адаптивной нейро-нечеткой сетью число настраиваемых коэффициентов. Параметры сети определяются в ходе обучения при помощи алгоритма обратного распространения ошибки на априорно определенных данных [10].

Функция *модуля статистических исследований* состоит в подтверждении или опровержении гипотез, выдвигаемых врачом-экспертом при помощи статистических критериев Стьюдента, Вилкоксона и  $\chi$ -квадрат, а также коэффициента корреляции [11]. По данным формализованным статистическим методам выбираются диагностические признаки при построении подсистем диагностики, а при увеличении базы данных отслеживаются изменения значимости признаков для диагностики болезни.

### 3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Работа АСДЗЛ реализована в двух режимах — основном и обеспечивающем.

В основном режиме АСДЗЛ решает задачу о подтверждении или опровержении выдвигаемого диагноза. Задействуются модуль диагностики болезни, база правил и база данных. Из базы знаний в модуль диагностики подгружается подсистема диагностики, а результат диагностики представляется на априорно определенных примерах из базы данных; в соответствие им ставится новый результат. Подсистема может дополняться и новыми примерами.

В обеспечивающем режиме разрабатываются подсистемы диагностики. Задействуются модули статистического исследования и выработки решения, а также база правил и база данных. Структура функционирования данного режима соответствует рис. 2, но только без модуля диагностики болезни. При построении подсистемы из базы данных в модуль статистического исследования отправляются априорно определенные данные. В модуле с помощью статистических критериев выбираются диагностические признаки, по которым затем строится подсистема диагностики. Выбранные признаки отправляются в модуль выработки решения, где строится подсистема диагностики, сохраняющаяся затем в базе знаний.

В случае увеличения числа примеров обеспечивающий режим способен переобучить подсистему из базы правил в модуле выработки решения. Причем структура вывода решения не меняется, переобучается только каскадная нейро-нечеткая сеть с учетом новых априорно определенных данных. Это снимает проблему разработки новой подсистемы, от пользователя не требуется понимания работы подсистемы.

В рамках предложенной АСДЗЛ были разработаны три подсистемы диагностики: две по параметрам РЭГ [7] и одна по параметрам ИГХВ [12].

### 4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

В качестве основного средства реализации АСДЗЛ был выбран математический пакет Matlab. Он представляет собой интерактивную систему, основным объектом которой является массив, не требующий явного указания размерности. Обладая множеством специализированных функций (статистический пакет, нейросетевой пакет и др.), данный программный продукт может быть использован для автоматизации требуемых вычислений

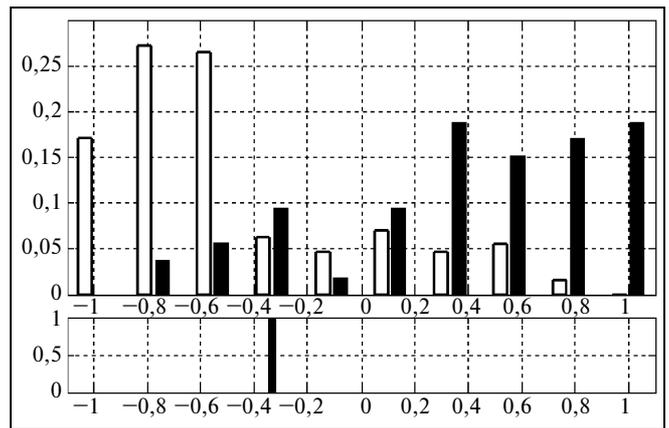


Рис. 3. Графическая интерпретация выхода подсистемы диагностики

практически в любой области науки и техники. Кроме того, по скорости выполнения вычислений его возможности превосходят потенциалы многих подобных систем.

Результаты проведенных исследований и созданных на их основе подсистем диагностики сохраняются в базе данных и базе знаний и отображаются в окне выбора модуля.

Загрузка диагностической подсистемы осуществляется через модуль диагностики заболеваний. Результат работы подсистемы дифференциальной диагностики БА и ХОБЛ по параметрам ИГХВ представляется в виде гистограммы (рис. 3) с априорно определенными данными, на которых подсистема обучалась, и ставящимися им в соответствие новыми данными. Если результат системы менее  $-0,4$ , то пациент скорее всего болен БА, а если более  $0,2$  — ХОБЛ.

Для запуска модуля статистических исследований необходимо выбрать базы данных в зависимости от диагноза в окне выбора модуля. К первому классу отнесли результаты исследований РЭГ для здоровых пациентов, а ко второму — результаты исследований РЭГ для пациентов с БА1 и БА2. Модуль исследований рассчитывает статистические критерии, что позволяет разработчику оценить значимость тех или иных признаков для диагностики болезни. В модуле имеется возможность графического отображения данных в виде топографических карт и гистограмм. Это весьма удобно, поскольку значения критериев свидетельствуют о существовании закономерностей в данных, в то время как рисунки наглядно демонстрируют характер этих закономерностей.

Диагностическая подсистема отражается в окне «Построение диагностической системы» (рис. 4) через меню «Модель/Создать». В окне допускается вести номера диагностических признаков, на ос-

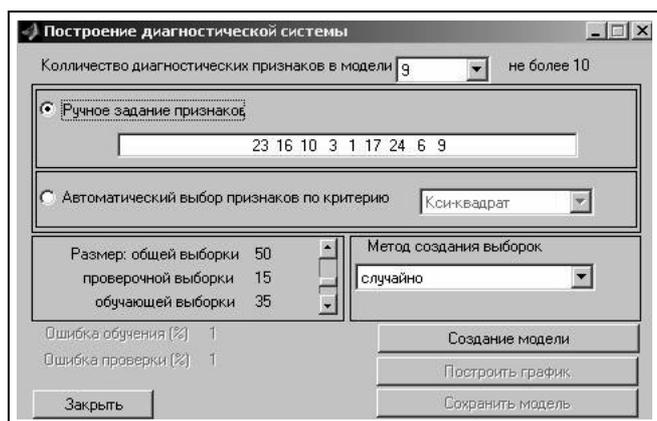


Рис. 4. Окно построения диагностической подсистемы

нове которых строится подсистема. Для проверки полученных результатов все имеющиеся данные разбиваются на проверочную и обучающую выборки. Размер и характер деления определяется пользователем. По разнице в ошибках при обчете системой обучающей и проверочной выборок пользователь судит, насколько адекватна, статистически значима построенная система.

Построенные подсистемы хранятся в базе знаний, откуда их можно в любой момент актуализировать для решения задач диагностики заболеваний легких.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные модули и реализованные на их основе режимы работы автоматизированной системы позволяют решать различные задачи, стоящие перед медицинскими работниками: от статистического анализа до построения подсистем диагностики и их применения для диагностики заболеваний легких на практике.

Способ диагностики бронхиальных заболеваний на основе РЭГ не имеет ограничений на применение, в отличие от способа ИГХВ, который способен вызвать чрезмерную бронхоспастическую реакцию, требующую неотложной помощи. Поэтому описанную автоматизированную систему диагностики можно применять при массовом обследовании (скрининге).

Предложенный алгоритм поиска информативных входов позволяет значительно сократить число входов, по которым строится блок принятия решений, значительно упрощает расчеты как на этапе проектирования, так и при работе системы на практике. Реализуемая в блоке принятия решений каскадная нейро-нечеткая сеть дает возможность

аппроксимировать имеющиеся в данных закономерности. «Мягкий» выход блока в диапазоне от  $-1$  до  $1$  помогает врачу выдвигать гипотезы о состоянии больного.

Дальнейшее развитие рассмотренной системы направлено на охват других заболеваний, связанных с поражением органов дыхания, и разработку для них систем диагностики посредством применения новых методов обследования, что поможет врачу в дифференциальной диагностике бронхолегочных заболеваний, а также в выборе эффективного лечения.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Поиск информативных входов реализуется в два этапа: на первом формируется уравнение с матрицей смешивания, которое необходимо решить, на втором вводится функционал, ограничивающий решение, и находится матрица смешивания.

### Этап 1. Формирование уравнения с матрицей смешивания

Пусть объект имеет  $n$  признаков  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , по которым можно определить класс объекта из двух возможных  $\{y\}$ .

Необходимо сократить имеющиеся признаки до  $m$   $\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ , для чего объединяем имеющиеся признаки в  $m$  групп. Группы формируются из признаков, которые имеют линейную зависимость или по представлению эксперта:

$$\begin{aligned}\hat{x}_1 &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{k_1}]^T \\ \hat{x}_2 &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{k_2}]^T \\ &\dots \\ \hat{x}_m &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{k_m}]^T,\end{aligned}$$

где  $n = k_1 + k_2 + \dots + k_m$ .

Для полученных групп необходимо решить уравнение вида:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1k_1} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w_{21} & \dots & w_{2k_2} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & w_{n1} & \dots & w_{nk_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \vdots \\ \hat{x}_m \end{bmatrix}$$

или

$$S = WX, \quad (1)$$

где  $W$  — матрица смешивания, подлежащая определению;  $S$  — независимые ненаблюдаемые выходы, подлежащие определению;  $X$  — зависимые наблюдаемые признаки.

### Этап 2. Формирование функционала

В рамках метода box-counting (подсчет ячеек) [3] было предложено понятие кросс-энтропии, позволяющее

качественно оценить энтропию по заполнению ячеек, на которые разбивается все пространство переменных:

$$I_{\text{box}}(x_1, x_2, \dots, x_d, y) = \log \frac{N_{x_1} \dots N_{x_d} N_y}{N_{xy}},$$

где  $N_{x_1}, \dots, N_{x_d}, N_y$  — число промежутков с присутствием координат  $x_1, x_2, \dots, x_d, y$  соответственно;  $N_{xy}$  — число клеток, в которых одновременно содержатся точки с координатами  $(x_1, x_2, \dots, x_d, y)$ .

Так как кросс-энтропия имеет очевидный недостаток (явно не представлена зависимость входов от выхода) и поэтому она способна реагировать на какую-либо зависимость между входами, то для ограничения решения уравнения (1) предлагается функционал вида:

$$F(s_1, s_2, \dots, s_m, y) = \log \frac{N_s}{N_{sy}} \rightarrow \max,$$

где  $N_s$  — число клеток, в которых одновременно содержатся точки с координатами  $(s_1, s_2, \dots, s_m)$ ;  $N_{sy}$  — число клеток, в которых одновременно содержатся точки обоих классов с координатами  $(s_1, s_2, \dots, s_m)$ .

Максимум функционала ищется путем перебора (сканирования) матрицы  $W$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев Л.А., Хуторская О.Е. Об одной оценке эффективности машины диагностики двигательных нарушений // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 12. — С. 112–121.
2. Арсеньев С. Извлечение знаний из медицинских баз данных / 1999 <<http://www.megaputer.ru>>.
3. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе / 1998 <<http://www.neuroproject.ru>>.
4. Луни А.А. и др. Бронхиальная астма. Пособие для врачей. — Смоленск: Смоленская гос. мед. акад., 2003. — 66 с.
5. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней (Руководство для врача). — М.: МЕДпресс-информ, 2004. — 488 с.
6. Перельман Ю.М., Приходько А.Г. Диагностика холодовой гиперреактивности дыхательных путей. — Благовещенск: ГУ ДНЦ ФПД СО РАМН, 2004. — 10 с.
7. Безруков Н.С., Ермакова Е.В. Прогнозирование бронхиальной астмы по параметрам реоэнцефалографии на основе гибридной сети. Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-19. — Воронеж, Воронеж. гос. технол. акад., 2006. — Т. 7. — С. 211–214.
8. Huvarinen A., Oja E. Independent Component Analysis: A Tutorial. — Laboratory of Computers and Information Science, Helsinki University of Technology. — Finland, 1999 <<http://www.cis.hut.fi/projects/ica/>>.
9. Безруков Н.С., Еремин Е.Л. Построение и моделирование адаптивной нейро-нечеткой системы в задачах медицинской диагностики // Информатика и системы управления. — 2005. — № 2 (10). — С. 36–46.
10. Рутковская Д., Пилинский В., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Горячая линия; Телеком, 2004. — 452 с.
11. Сырцова Л.Е. и др. Основы эпидемиологии и статистического анализа в общественном здоровье и управлении здравоохранением. Ч. 1. Московская мед. акад. им. И.М. Сеченова. Учебное пособие для ординаторов и аспирантов. — Москва, 2003. — С. 92.
12. Безруков Н.С. и др. Система поддержки принятия решения для диагностики бронхиальной астмы и хронической обструктивной болезни легких // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. — 2006. — Вып. 23 (приложение). — С. 32–34.

☎ (4162) 39-46-50, e-mail: bezrukow@mail.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Новосельцевым. □

## Новые книги

- Колесников А.А. Гравитация и самоорганизация. — М.: URSS, 2006. — 108 с.
- Неусыпин К.А. Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. — М.: МГОУ, 2006. — 219 с.
- Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем. — М.: URSS, 2006. — 351 с.
- Системный подход к управлению информацией. — М.: URSS, 2006. — 324 с.
- Системы управления: инжиниринг качества. — М.: Вузовская книга, 2006. — 315 с.
- Экология и экономика природопользования. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. — 591 с.
- Аалст Вил ван дер. Управление потоками работ. — М.: Физматлит, 2007. — 315 с.
- Александров И.О. Формирование структуры индивидуального знания. — М.: Ин-т психологии РАН, 2006. — 559 с.
- Ащепков Л.Т. Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления. — М.: Наука, 2006. — 151 с.
- Бодунов Н.А. Введение в теорию локальной параметрической идентифицируемости. — СПб., 2006. — 143 с.
- Лукьянов В.С. Модели анализа вероятностно-временных характеристик и структур сетей передачи данных. — Волгоград: Политехник, 2006. — 183 с.
- Максимов Н.В. Архитектура ЭВМ и вычислительных систем. — М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2007. — 511 с.
- Основные философские направления и концепции науки и технoзнания. — СПб., 2006. — 420 с.
- Самарский А.А. Устойчивость разностных схем. — М.: УРСС, 2005. — 384 с.
- Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. — М.: URSS, 2006. — 439 с.
- Шарапов В.М. Универсальные технологии управления. — М.: Техносфера, 2006. — 494 с.
- Петров К.Н. Как разработать бизнес-план. — М.: Вильямс, 2007. — 384 с. (+CD-Rom).
- Тидвелл Д. Разработка пользовательских интерфейсов. — СПб.: Питер, 2007. — 416 с.

# МЕТОД ВЛОЖЕННЫХ КООРДИНАТ

В.А. Жевнеров

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Представлен метод, разработанный для описания систем массового обслуживания с полумарковскими процессами функционирования и пригодный для всех видов систем, описываемых с помощью иных методов, а также для некоторых новых видов систем. Отмечено, что его применение, как правило, требует наименьших трудозатрат.

В настоящее время для описания систем массового обслуживания (СМО) с полумарковскими процессами наиболее часто применяются метод катастроф [1] и метод «красных и синих» [2].

Метод катастроф представляет собой скорее мнемоническое правило составления уравнений. Суть его заключается в трактовке преобразования Лапласа плотности распределения вероятностей (п. р. в.) длительности интервалов времени между элементами вложенной марковской цепи в виде взаимно независимых вероятностей перехода и применении для описания полученной таким образом стохастической сети обычных методов теории вероятностей.

Метод «красных и синих» применяется для описания СМО, на марковский или полумарковский процесс функционирования которых налагаются дополнительные ограничения или факторы. Например, могут вводиться ограничения на длину очереди, время пребывания заявки в очереди или в системе. Для описания влияния таких факторов вводятся дополнительные переменные в виде вероятностей «подкрашивания» заявок в различные цвета. При этом число таких цветов, как правило, соответствует числу дополнительных учитываемых факторов. Уравнения связи составляются для некоторых созданных искусственным образом состояний, например, описывается вероятность пребывания в приборе, очереди или системе заявок только определенного цвета. Недостаток метода «красных и синих» заключается в отсутствии четкой методологии составления уравнений для учета факторов различного вида и их сочетаний. Здесь важное значение имеет опыт исследователя.

Традиционные методы теории массового обслуживания основаны на описании процесса функционирования СМО относительно «неподвижных» приборов обслуживания. Существо метода вложенных координат (МВК) заключается в описании процесса обслуживания произвольно выделенной заявки. Этот метод разработан для описания однофазовых СМО с пуассоновскими входящими потоками и полумарковскими процессами обслуживания. Для таких систем процесс поступления заявок является марковским, а марковская цепь образуется множеством  $T = \{t_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots$  моментов времени окончания или начала немарковских процессов обслуживания заявок в приборах. Каждой точке  $t_i$  марковской цепи соответствует множество  $U = \{u_n\}$  возможных состояний СМО. При этом состояние системы описывается только подмножеством параметров, оказывавших влияние на процесс обслуживания выделенной заявки. Обычно состояние  $u_n$  определяется количеством заявок  $n$ , находящихся в системе и влияющих на очередность обслуживания выделенной заявки.

Процесс обслуживания заявки условно разделяется на три этапа:

этап 1 — от момента поступления заявки в систему до наступления первого момента времени  $t_1 \in T$ ;

этап 2 соответствует процессу ожидания заявки в очереди на обслуживание с момента времени  $t_i$  до момента  $t_i \in T$  поступления заявки на прибор;

этап 3 — собственно обслуживание заявки в приборе.

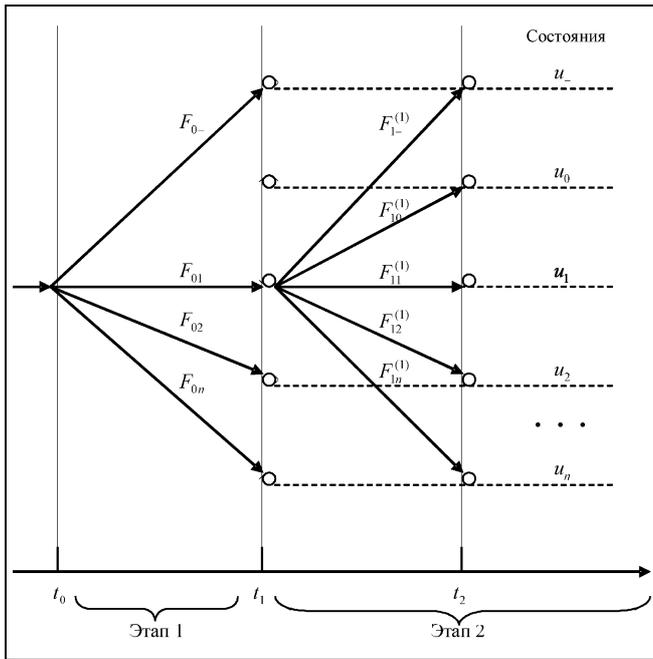


Рис. 1. Обобщенная структура графа, описывающего процесс обслуживания заявки в потоковом представлении

На вход системы в момент времени  $t_0$  (рис. 1) поступает заявка. Показатель качества обслуживания (критерий)  $f$  рассматривается в потоковом представлении [3]. Обычно для СМО в качестве критериев применяются:  $p_c$  — вероятность обслуживания заявки,  $g^*(s)$  — преобразование Лапласа п. р. в. времени обслуживания,  $\bar{t}$  и  $\bar{t}^2$  — первый и второй моменты времени обслуживания.

Поступившей заявке соответствует значение критерия  $f = f_0$ . К моменту  $t_i$  заявка будет находиться в одном из состояний системы в соответствии с операторами  $F_{0i}$ , определяющими значения  $F_{0i} = F_{0i}[\bar{X}]$  при переходе поступившей заявки в

состояние  $u_j$ , где  $\bar{X}$  — множество параметров, влияющих на процесс обслуживания выделенной заявки. В дальнейшем операторы, определяющие переходы из состояний  $u_i$  в  $u_j$  и соответствующие значения  $f_{ij}$ , обозначаются для марковской цепи операторами  $F_{ij}[\bar{X}]$ .

Состояние  $u_-$  соответствует выходу необслуженной заявки из системы (отказ в обслуживании),  $u_0$  — выходу обслуженной заявки,  $u_1$  — поступлению заявки в обслуживающий прибор,  $u_n$  — пребыванию в системе  $n$  заявок, включая рассматриваемую.

Результатом описания служит определение значений критериев  $f$  для суммарного выходящего потока.

Структура операторов  $F_{ij}$  и  $F_{0i}$  определяется видом описываемого критерия  $f$  и особенностями построения СМО — дисциплинами очереди, законами обслуживания, системами приоритетов и т. д. Примеры составления операторов для потоковых систем показаны в работе [4]. В отличие от метода «красных и синих» особенности построения СМО учитываются наиболее естественным образом, и для этого не требуется введение дополнительных искусственных переменных в виде «подкрашивания» потока заявок. Если операторы  $F_{ij}$  для марковской цепи не зависят от номера  $n$  состояния  $u_n$ , граф на рис. 1 для этапа 2 обслуживания можно представить в более компактном виде, приведенном на рис. 2, т. е. размерность графа в этом случае будет уменьшена на единицу.

Для описания выходящего потока  $f_{j0}$  и остальных потоков, циркулирующих в графах, достаточно применения прямых и обратных уравнений Колмогорова—Чэпмена [5].

В общем случае для описания критериев  $g^*(s)$  и  $\bar{t}^n$  необходимо определить сначала вероятности  $\pi_i$

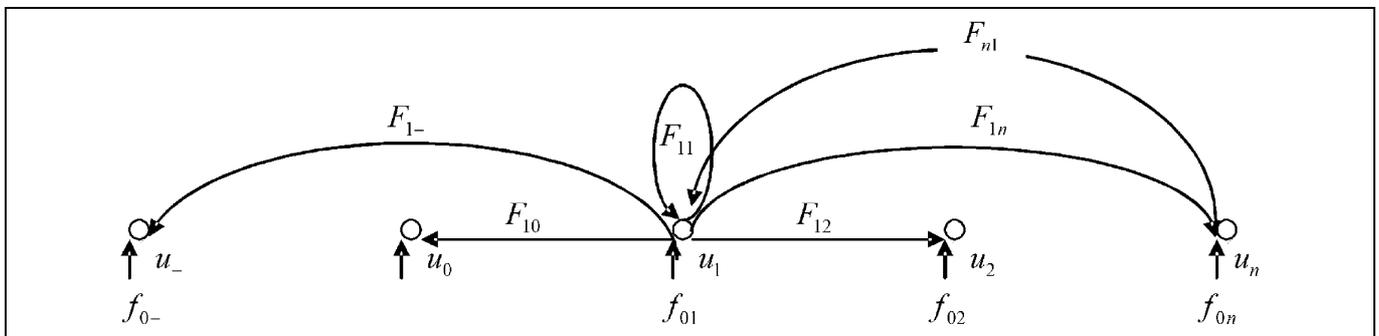


Рис. 2. Граф, описывающий процесс обслуживания заявки на этапе 2



пребывания СМО в состояниях  $u_i$  на элементах марковской цепи. Для этого следует построить соответствующий граф, определить операторы  $F_{ij}$  и составить систему уравнений относительно  $\pi_i$ . Отметим, что такие уравнения составляются в соответствии с традиционным подходом [6], т. е. с привязкой к «неподвижным» приборам обслуживания.

Таким образом, в МВК используются основные известные методы и подходы к описанию СМО:

— часть уравнений состояния формируется с привязкой к «неподвижным» приборам обслуживания;

— применяется аппарат описания марковских и полумарковских процессов прямыми и обратными уравнениями Колмогорова — Чэпмена;

— особенности вида СМО учитываются на этапе построения потоковой модели в виде графа и описания операторов (аналог — введение дополнительных переменных в методе «красных и синих»);

— метод катастроф применяется для описания наиболее распространенных критериев в виде преобразования Лапласа; кроме этого, в методе вложенных координат дополнительно применяется потоковое представление критериев, а процесс обслуживания описывается в виде потоковой модели

относительно произвольно выделенной заявки с использованием метода операторных уравнений.

Особенность потоковых моделей описания процесса функционирования СМО состоит в наличии жесткой корреляции между п. р. в. времени перехода системы в различные состояния и значениями вероятностей таких переходов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. — М.: Мир, 1979.
2. Климов Г. Стохастические системы обслуживания. — М.: Наука, 1970.
3. Жевнеров В.А. Потоковые системы. Моделирование и оптимизация. — М.: Наука, 2002.
4. Жевнеров В.А. Применение балансных уравнений в задачах описания стохастических сетей / Проблемы управления. — 2004. — № 2. — С. 63—65.
5. Саати Т. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. — М.: Сов. радио, 1971.
6. Тютюник М.Б. Использование информационного графа при распараллеливании вычислений для системы конфликтных продуктов / Информатика и системы управления. — 2006. — № 1. — С. 26—32.

☎ (495) 334-89-70, e-mail: jewn@mail.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Редкозубовым. □



## Не забудьте подписаться!

**Подписку на журнал «Проблемы управления»** можно оформить с любого месяца в любом почтовом отделении (подписные индексы 81708 и 80508 в каталоге Роспечати или 38006 в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию. Отдельные номера редакция высылает по первому же требованию.

**Подписка через редакцию — выгодное предложение для Вас!** Подписаться через редакцию можно с любого месяца, здесь можно приобрести любой номер журнала за прошедшие годы. Позвоните в редакцию по тел. (495) 334-92-00 или обратитесь по электронной почте [ru@jri.ru](mailto:ru@jri.ru) — и подписка будет оформлена. Почтовые расходы по пересылке журнала редакция берет на себя.

Оформить подписку можно через группу компаний «Урал-Пресс» (см. <http://www.ural-press.ru/>) и агентство «Коммерсант — Курьер» (см. [www.kotcur.ru](http://www.kotcur.ru)), которые проводят подписку на наш журнал во многих городах России.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ПРИОБРЕТЕНИИ ФРАНШИЗЫ

И.Д. Котляров

*Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет*

На основе введенного понятия вероятностного чистого приведенного дохода построена модель принятия решения в случае выбора между приобретением франшизы и созданием собственного независимого предприятия.

## ВВЕДЕНИЕ

Франчайзинг<sup>1</sup> появился в России в 1990-х гг. и с тех пор бурно развивается. Однако, в отличие от других новых методов ведения бизнеса, проникших в Россию одновременно с ним (вспомним, например, лизинг, факторинг, форфейтинг), он пока не стал предметом пристального научного внимания ни в России, ни, что еще интереснее, за рубежом — не говоря уже о его математическом моделировании. Действительно, формулы, описывающие, скажем, лизинговые или форфейтинговые отношения, можно легко найти в соответствующих учебниках [1, 2], по лизингу защищаются диссертации (в большом количестве и, к сожалению, совершенно разного научного уровня) и пишутся статьи. Книги же, посвященные франчайзингу и публикуемые как за рубежом [3—5], так и в нашей стране [6—8], являются, по сути, пособиями для предпринимателей, желающими стать франчайзерами или франчайзи, т. е. предназначены для практикующих бизнесменов и не стремятся дать подлинно научное описание этого феномена. Статей и диссертаций по франчайзингу до обидного мало, немногочисленные исключения из этой печальной тенденции — работы [9—11] не всегда доступны широкой научной аудитории.

В настоящей статье делается попытка хотя бы отчасти заполнить пробел в исследовании франчайзинга и смоделировать один из аспектов этого явления, а именно: процесс принятия решения о покупке франшизы начинающим предпринимателем.

<sup>1</sup> Основные понятия франчайзинга пояснены в Приложении.

## 1. ОГРАНИЧЕНИЯ, НАЛАГАЕМЫЕ НА МОДЕЛЬ

Введем следующие ограничения.

- Начинаящий предприниматель действует рационально. Очень важный момент — следует уточнить, что мы имеем в виду под рациональным поведением. Как правило, под этими словами подразумевается, что предприниматель заинтересован в максимизации своей прибыли (или, более строго, чистого приведенного дохода), и это в принципе верно. Однако при этом совершенно упускается из виду следующий ключевой момент: начинающий предприниматель (он же — потенциальный франчайзи) создает семейное предприятие, которое будет относиться к мелкому или среднему бизнесу (по данным статистики, предприятия-франчайзи относятся именно к этой категории и, как правило, являются семейными [4]) и которое будет кормить его самого и его семью. Соответственно, для такого предпринимателя, помимо высокого дохода, очень важна гарантия финансовой стабильности, т. е. что основанная им компания будет долго приносить доход (пусть даже не максимально возможный) ему и его семье. Ему не нужен ни немедленный одноразовый большой заработок, после которого компания прекратит свое существование, ни многолетняя работа без прибыли в течение продолжительного срока в надежде на разовый большой доход в будущем — он заинтересован в равномерных денежных поступлениях. Чувство ответственности за семью пересиливает стремление к максимально возможной, но рискованной прибыли. В идеале речь идет о том, чтобы предприятие существовало достаточно долго для того, чтобы оно могло быть передано его наследникам (т. е., по сути, о бесконечном горизонте планиро-



вания) — и, соответственно, обеспечить и их источником дохода. Таким образом, под рациональным поведением будем понимать стремление предпринимателя найти оптимальное сочетание размера дохода и его стабильности.

- Начинаящий предприниматель имеет свободный доступ ко всей необходимой ему статистической информации.
- Начинаящий предприниматель уже выбрал интересный для него сектор деятельности и знает, у кого именно он будет покупать франшизу, если будет принято такое решение. Речь идет именно о выборе варианта начала бизнеса (франшиза или под собственной торговой маркой), но не о выборе сектора деятельности или о выборе франчайзера. В принципе, модель может быть обобщена на случай выбора из  $N$  потенциальных франчайзеров, но это сделает расчеты несколько более громоздкими, сейчас же я хочу предложить принципиальную модель.
- Обозначим через  $m$  средний срок существования самостоятельного предприятия малого и среднего бизнеса в выбранной отрасли, а через  $k$  — средний срок договора франчайзинга, предлагаемого интересующим начинающего предпринимателя франчайзером. Пусть  $k = m$  — при таком допущении, как станет ясно далее, модель получит еще большую наглядность.
- С момента первой продажи франшизы данным франчайзером прошло  $T$  лет, причем срок  $T$  больше  $m$  и  $k$ .
- За время  $T$  на рынке не происходило резких потрясений и нет прогнозов таких потрясений (появления новых технологий, которые сделают нерентабельной технологию, разработанную франчайзером, и др.).
- Время в рассматриваемой модели дискретно, за единицу времени принят календарный год; иными словами, условимся считать, что предприятия начинают функционировать 1 января и прекращают работу (если такое происходит) 31 декабря. Это допущение, не влияя на общий характер модели, существенно упрощает структуру формул.
- Начинаящий предприниматель в случае приобретения франшизы не претендует на роль мастер-франчайзи. Он желает заниматься только коммерческой деятельностью в соответствии с условиями франшизы.

## 2. КРИТЕРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Пусть  $M_0$  — число самостоятельных предприятий малого и среднего бизнеса, организованных в некоторый год из промежутка  $T$  (в соответствии с вышеуказанной договоренностью, все  $M_0$  предприятий были открыты 1 января). Обозначим номер этого года через  $u$ , причем выполняются два неравенства:  $e + m \leq T$ ,  $u + k \leq T$ .

Для удобства присвоим году  $u$  порядковый номер 1.

Пусть в тот же год открылось  $K_0$  франчайзи интересующего нас франчайзера.

Обозначим через  $M_i$  и  $K_i$  соответственно число самостоятельных предприятий и число франчайзи, не прекративших свое существование 31 декабря  $i$ -го года,  $i = 1, 2, \dots, m$  (или  $k$ , поскольку в соответствии со сформулированными выше условиями  $k = m$ ). Обозначим через  $PK_i$  вероятность того, что франчайзи не прекратит свою деятельность 31 декабря  $i$ -го года, а через  $PM_i$  — вероятность того, что 31 декабря  $i$ -го года не прекратит свою деятельность самостоятельное предприятие. Очевидно, что эти вероятности рассчитываются по следующим формулам:

$$PK_i = \frac{K_i}{K_0}; \quad PM_i = \frac{M_i}{M_0}.$$

Важно, что эти вероятности носят интегральный характер и не дают представления о том, какие причины привели к закрытию предприятия. Достаточно очевидно, что эти причины могут различаться для самостоятельных предприятий и для франчайзи — например, к закрытию франчайзи приведет расторжение договора франчайзинга по инициативе франчайзера. Но, повторимся, сами эти причины не могут быть выведены из показателя вероятности закрытия 31 декабря  $i$ -го года.

Обозначим ежегодную выручку типичного самостоятельного предприятия как  $BA_i$ , а ежегодную выручку типичного франчайзингового предприятия — как  $BF_i$  (выручка типичного предприятия рассчитывается как среднее арифметическое выручки всех предприятий данного типа — как правило, в рассматриваемом случае они весьма близки по размерам и обороту, и такая процедура усреднения допустима). Аналогично обозначим через  $EA_i$  и  $EF_i$  ежегодные издержки соответственно типичного самостоятельного и типичного франчайзингового предприятия (процедура расчета издержек типичного предприятия аналогична процедуре расчета выручки). Уточним, что у франчайзингового предприятия издержки включают в себя дополнительный пункт — роялти  $R$  (значение которого зависит от выручки). Начальные инвестиции в открытие соответственно франчайзингового и самостоятельного предприятия обозначим  $IF$  и  $IA$ . Всех этих показателей достаточно для расчета чистого приведенного дохода типичного франчайзи  $NPVF$  и типичного самостоятельного предприятия  $NPVA$ . Пока мы полностью рассуждаем в рамках традиционной модели принятия решений — следующим шагом должно было бы стать сопоставление значений  $NPVF$  и  $NPVA$ . Однако в этом случае мы не можем учесть стабильность получения до-

хода — что, как было сказано, особенно важно для семейных предприятий.

Введем понятие «вероятный чистый приведенный доход» ( $NPV_p$ ) и определим его как произведение чистого приведенного дохода на вероятность его получения. Для типичного самостоятельного предприятия и типичного франчайзи вероятный чистый приведенный доход будет рассчитываться по следующим формулам:

$$NPV F_p = \sum_{i=1}^k \frac{PK_i(BF_i - EF_i - R_i)}{(1+d)^i},$$

где  $NPV F_p$  — чистый приведенный доход типичного франчайзингового предприятия,  $d$  — ставка дисконтирования;

$$NPV A_p = \sum_{i=1}^m \frac{PM_i(BA_i - EA_i)}{(1+d)^i},$$

где  $NPV A_p$  — чистый приведенный доход типичного самостоятельного предприятия.

Решение о приобретении франшизы должно приниматься на основе сопоставления вероятностных чистых приведенных доходов:

— если  $NPV F_p > NPV A_p$ , то предпринимателю следует приобретать франшизу и отказаться от планов создания предприятия под собственной торговой маркой;

— если  $NPV F_p < NPV A_p$ , то предприниматель должен создать самостоятельное предприятие, а покупка франшизы является нецелесообразной;

— если  $NPV F_p = NPV A_p$ , то предприниматель должен приобрести франшизу, если для всех  $PK_i$  и  $PM_i$  справедливы неравенства  $PK_i > PM_i$ ; во всех остальных случаях решение должно приниматься с учетом дополнительных факторов (личные предпочтения предпринимателя, рекомендации более опытных людей и др.).

Использование показателя вероятностного чистого дохода для принятия решения о целесообразности приобретения франшизы имеет глубокий экономический смысл. Собственно чистый приведенный доход проекта позволяет нам только оценить нашу прибыль от участия в проекте, но ничего не говорит о вероятности ее получения; вероятность выживания предприятия в  $i$ -м году показывает, сколько времени способно просуществовать предприятие, но не дает возможности оценить доход предприятия за это время. Сочетание двух этих характеристик в показателе вероятностного чистого приведенного дохода позволяет сопоставлять проекты с совершенно разными величинами доходности и рисков — как, например, в нашем случае сравнения франчайзи и самостоятельного предприятия. Действительно, прибыль франчайзи вполне может быть ниже (порой —

существенно) прибыли владельца независимого предприятия, и не только за счет роялти, но и в силу необходимости полной финансовой прозрачности для франчайзи (что предусматривается договорами франчайзинга и корпоративными стандартами франчайзинговых сетей и призвано поддерживать их имидж, а также упрощать франчайзеру контроль за франчайзи), тогда как собственник самостоятельного предприятия имеет возможность пользоваться «черной» бухгалтерией, обращать меньше внимания на оформление торговых залов и др. Однако франчайзи закрываются гораздо реже, чем независимые предприниматели. Сравнить франчайзи и независимые компании только по сроку жизни фирмы или только по  $NPV$  было бы не совсем корректным — слишком велик разброс значений между этими двумя типами предприятий; вероятностный чистый приведенный доход позволяет сгладить этот разброс и делает возможным сравнение франчайзи и независимых предпринимателей.

### 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОДЕЛИ НА СИТУАЦИИ С ИНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Интересно также рассмотреть случай  $k < m$ . Для удобства предположим, что  $m$  кратно  $k$ , т. е.  $m = Zk$ ,  $Z > 1$ ,  $Z$  — целое число (это упростит запись формул, но не скажется на общем характере модели). Далее, пусть по-прежнему выполняется неравенство  $y + m \leq T$ . В этом случае нам нужно учесть возможность продления договора франчайзинга (пусть каждый раз этот договор продлевается на  $k$  лет). Таким образом, договор франчайзинга продлевается  $Z - 1$  раз.

Введем показатель «вероятность продления франчайзингового договора» по формуле:

$$PPK = \frac{K_{k+1}}{K_k}.$$

Тогда полный вероятностный чистый приведенный доход франчайзи можно рассчитать по следующей формуле:

$$NPV F_p = \sum_{i=1}^k \frac{PK_i(BF_i - EF_i - R_i)}{(1+d)^i} + \sum_{j=1}^{Z-1} PPK_j \left[ \sum_{l=1}^k \frac{PK_{lj}(BF_{lj} - EF_{lj} - R_{lj})}{(1+d)^{jk+l}} \right]. \quad (1)$$

Индексы  $l$  и  $j$  указывают на значения соответствующего показателя в  $l$ -й год  $j$ -го цикла продления договора.

Далее чистые приведенные доходы франчайзи и самостоятельного предприятия сравниваются по схеме, приведенной выше.



Наконец, пусть каждый раз договор франчайзинга заключается на особо оговоренный срок  $k_j$ . Тогда формула (1) приобретет вид:

$$NPVF_p = \sum_{i=1}^k \frac{PK_i(BF_i - EF_i - R_i)}{(1+d)^i} + \sum_{j=1}^{Z-1} PPK_j \sum_{i=1}^{k_j} \frac{PK_{ij}(BF_{ij} - EF_{ij} - R_{ij})}{(1+d)^{k+l+\sum_{j=1}^{i-1} k_j}}$$

К этой формуле, как легко показать, тривиально сводится случай, когда  $m$  не кратно  $k$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика представляет собой первый опыт применения математического моделирования для анализа критериев принятия решения о покупке франшизы. Она позволяет принимать экономически целесообразные решения в ситуации выбора между приобретением франшизы и развитием бизнеса под собственной торговой маркой на рынках со свободным доступом к информации и сложившимися традициями франчайзинга. К таким рынкам можно, хотя и с определенными оговорками, отнести и Россию — франчайзинг в нашей стране существует около 15-ти лет, и за это время накопилась достаточно обширная статистика, которая может быть предоставлена как франчайзерами, так и Российской ассоциацией франчайзинга.

Методика, к сожалению, в чистом виде непригодна для принятия решения о покупке франшизы в следующих ситуациях:

- франчайзер впервые предлагает свою франшизу в данном регионе;
- отсутствует или недоступна информация о среднем сроке жизни независимых предприятий соответствующего профиля в данном регионе.

Дальнейшие исследования должны адаптировать предложенную методику для применения в этих двух ситуациях.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

**Франчайзинг** (от англ. *franchise* — привилегия; *franchising* — предоставление привилегий) — 1) передача права (на определенный срок, на определенных условиях и на определенной территории) на использование торговой марки, товарного знака и фирменного наименования и связанных с ними технологий и «ноу-хау»; 2) создание сети представительств компании-собственника торговой марки и технологий путем передачи независимым предприятиям права на использование тор-

говой марки, товарного знака и фирменного наименования и связанных с ними технологий и «ноу-хау».

**Франшиза** — право на использование торговой марки, товарного знака и фирменного наименования и связанных с ними технологий и ноу-хау.

**Франчайзер (франшизодатель)** — компания, обладающая известной (на региональном, национальном и (или) международном уровне) и хорошо зарекомендовавшей торговой маркой и развивающая свою сеть путем передачи прав на использование своей торговой марки независимым компаниям.

**Франчайзи (франчайзиат, франшизополучатель)** — независимая компания или частный предприниматель, приобретающий у франчайзера на определенных условиях право на использование его торговой марки и связанных с ней технологий на определенный срок, на определенных условиях и на определенной территории. Разновидность франчайзи — *мастер-франчайзи*, имеющий право не только осуществлять коммерческую деятельность под маркой франчайзера, но также заниматься *суб-франчайзингом*, т. е. передавать право на использование торговой марки франчайзера и связанных с ней технологий и ноу-хау другим компаниям, расположенным на предоставленной ему территории (*суб-франчайзи*).

**Роялти** — регулярные денежные отчисления, производимые франчайзи франчайзеру за право пользования его торговой маркой и связанными с ней технологиями и ноу-хау. Представляют собой либо фиксированную сумму, либо процент от оборота или прибыли франчайзи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Лещенко М.И.* Основы лизинга. — М.: Финансы и статистика, 2000.
2. *Павлов В.В., Хоминич И.П.* Кредитование внешнеэкономической деятельности. — М.: ФБК-Пресс, 1998.
3. *Hermel L., Romagni P.* La franchise de service. Une stratégie marketing pour le développement des réseaux. — Paris: ECONOMICA, 1992.
4. *Thiriez G., Pamier J.-P.* Guide pratique de la franchise. — Paris: Editions d'Organisation, 1998.
5. *Stanworth J., Smith B.* The Barklays Guide to Franchising for the Small Business. — Oxford: Blackwell, 1991.
6. *Практикум по франчайзингу для российских предпринимателей / Под ред. С.А. Силинга.* — СПб., 1997.
7. *Рыкова И.В.* Франчайзинг: новые технологии, методология, договоры. — М.: Современная экономика и право, 2000.
8. *Стэнворт Дж., Смит Б.* Франчайзинг в малом бизнесе. — М.: Аудит; ЮНИТИ, 1996.
9. *Баженов А.В.* Моделирование общих проблем управления франчайзинговой системой: Автореф. дис... канд. экон. наук. — М.: МГТУ «Станкин», 2000.
10. *Алгазина Д.Г.* Особенности определения стратегии ценообразования в производственно-торговых франчайзинговых системах // Известия Алтайского государственного университета. — 2005. — Вып. 2 (36).
11. *Королева Н.С.* Показатели и критерии оценки эффективности франчайзинга в предпринимательской деятельности // Вестник ИНЖЭКОН. — 2006. — Вып. 4 (13).

e-mail: [lrgp@mail.ru](mailto:lrgp@mail.ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.М. Нижегородцевым. □



# CONTENTS & ABSTRACTS

## CONTROLLING "THE MARKET FOR LEMONS": INSTITUTIONAL ANALYSIS OF ADVERSE SELECTION PROBLEM. . . . . 2

**Nizhegorodtsev R.M., Yaroslavskaya D.I.**

The paper examines key institutional problems related with adverse selection in contemporary markets. The reasons evoking adverse selection, its consequences, opportunities and methods to control the situation and, at the best, to overcome the adverse selection are discussed.

## UTILITY AND RISK MODELS IN AGING SYSTEMS CONTROL PROBLEMS. . . . . 15

**Baranov V.V., Matrosov V.M.**

A utility model determining a priori preferences on control alternatives and a model of risk arising while selecting among the alternatives of situation diagnostics are built. Both are intended for aging systems control applications.

## A DISCRETE MODEL OF COMPOUND SYSTEMS DESTRUCTION. . . . . 21

**Kochkarov A.A., Salpagarov M.B., Elkanova L.M.**

The phenomenon of destruction of information, power, transportation, and communication systems with compound structure is investigated. A discrete (graph-theory) model of system destruction phenomenon is offered. Various criteria (tonal destruction criterion, components criterion, connectedness criterion, diametrical criterion) of system failure under destruction are proposed. The scenarios of system destruction with different epicenters are examined.

## PSEUDOSPECTRA AND LINEAR SYSTEMS STABILITY . . . . 27

**Devyatisil'nyi A.S., Kislov D.E.**

The paper offers a numerical technique for analyzing the mathematical correctness of a number of problems based on a formulated and proved theorem about the localization of spectral portraits of 2 close-in-norm linear operators. With a case study of near-to-stationary orbits determination, the efficiency of the technique's application in satellite navigation is shown.

## SYSTEM APPROACH TO TRIADS-BASED ANALYSIS OF COMPLEX SYSTEMS AND PROCESSES. . . . . 32

**Guzairov M.B., Il'yasov B.G., Gherasimova I.B.**

The expediency of investigating complex systems as ordered collections of elementary systems in triad form is discussed. The paper shows that some processes related with goal attainment or getting new knowledge can be represented as an heuristic scheme of sequentially connected triads.

## ON A MODEL OF A CONTROLLABLE QUEUING SYSTEM . . 39

**Kuznetsov A.V., Mandel' A.S., Tokmakova A.B.**

A model of a controllable queuing system is investigated. The number of service devices in a multiserver queuing system is used as controllable and dynamically optimized parameter and can be chosen as a function of time-varying input process intensity. The time variation of incoming flow intensity is a discrete time finite-state Markovian chain.

## STRUCTURAL STABILITY OF PRODUCTION SYSTEMS CONTROL MODEL. . . . . 44

**Stolbov V.Yu., Ghitman M.B., Fedoseev S.A.**

The structural stability principle for a hierarchical multi-scale model of a compound production control system is proposed. The sufficient Hadamard stability conditions are formulated, and, on their basis, the number of necessary structural levels and the degree of model uncertainty on each level can be determined. The comparison of JIT and MRP modern enterprise resource planning and management systems is included.

## A MATHEMATICAL MODEL OF A LONG-TERM ARMED CONFLICT . . . . . 48

**Buyanov B.B., Lubkov N.V., Polyak G.L.**

The dynamics of forces strengths of two combatants in a long-term conflict is examined. Based on average statistical casualties for some ear-

lier period, a model is based enabling the prediction of forces strength subject to casualties and bringing reserves into action.

## ON A MODEL OF MAIL DELIVERY PROCESS IN LARGE ORGANIZATIONAL SYSTEMS . . . . . 52

**Bakanova N.B., Vishnevsky V.M., Semyonova O.V.**

A mathematical model of mail delivery processes is developed. The models allows to estimate the efficiency of automatic delivery notification software and other performance parameters related with timely mail delivery in large organizational systems.

## SEPARATED INQUIRY TECHNIQUES FOR REMOTE DATA ACCESS MANAGEMENT IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS. . . . . 56

**Lebedev V.N., Kurako E.A., Moskalkov V.E., et al.**

The problem of managing the protected access to remote databases under enquiry system flexibility, security and guaranteed deliveries in modern distributed information systems is discussed. A method to solve the problem based on the separated inquiries is offered. Each separated inquiry includes a fragment of data management and a fragment of access management. The method's mechanism is described and the language structures of fragments are presented. The comparison against other methods is included.

## IMPROVING THE PROCESSING EFFICIENCY OF APERIODIC TASK STREAMS IN INFORMATION SYSTEMS. . . . . 61

**Danilova S.A.**

The paper offers an approach to rational planning of aperiodic task streams based on expert information and fuzzy derivation algorithms.

## IMPLEMENTATION OF TRAINING EXERCISES IN A COMPUTERIZED TRAINING SYSTEM . . . . . 65

**Kulida E.L.**

A technique is proposed enabling to automatize training and examination process and to create and edit training exercises in process of training system operation.

## A FRAMEWORK FOR DEVELOPING ENERGY-EFFICIENT CONTROL ALGORITHMS FOR INDUSTRIAL PLANTS . . . . 69

**Muromtsev Yu.L., Tyurin I.V.**

The paper discusses optimal control problems of energy-intensive devices and the ways to overcome them. An informational framework for solving a set of optimal control problems for industrial plants is considered. Application examples are included.

## A COMPUTER-BASED SYSTEM FOR LUNGS DISEASES DIAGNOSTICS. . . . . 75

**Bezrukov N.S., Yeregin E.L., Perelman Yu.M.**

A computer-based system for bronchial asthma diagnostics and obstructive lungs disease on isocapnic cold air hyperventilation and rheoencephalography characteristics is offered in the work. The diagnostic system is implemented on the basis of a neuro-fuzzy network.

## NESTED COORDINATES TECHNIQUE . . . . . 81

**Zhevnerov V.A.**

The paper presents a method developed for the characterization of queuing systems with semi-Markovian functioning processes. The method is applicable for any system characterized by different techniques as well as for some other system types. Its application is typically less laborious.

## A MATHEMATICAL MODEL OF DECISION-MAKING ABOUT FRANCHISE ACQUISITION. . . . . 84

**Kotlyarov I.D.**

Based on the idea of probabilistic net present value, the mathematical model is built of decision-making process in case of selecting between franchise acquisition and establishing an independent enterprise.