

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4/2012

CONTROL  SCIENCES

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф.Т. Алескеров, А.А. Амбарцумян, В.Н. Афанасьев, Р.Р. Бабаян, Л.П. Боровских, В.Н. Бурков, акад. РАН С.Н. Васильев, В.А. Виттих, Б.Г. Волик, А.А. Дорофеюк, акад. РАН С.В. Емельянов, Э.Л. Ицкович, чл.-корр. РАН И.А. Каляев, В.Ю. Кнеллер, О.С. Колосов, О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, В.Г. Лебедев, акад. РАН В.А. Левин, Г.Г. Малинецкий, В.Д. Малюгин, А.С. Мандель, чл.-корр. РАН Н.А. Махутов, акад. РАН Е.А. Микрин, Р.М. Нижегородцев, В.В. Никитин, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков, В.Н. Новосельцев, К.Б. Норкин, Б.В. Павлов, чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко, Ф.Ф. Пащенко, С.А. Редкозубов, чл.-корр. РАН А.Ф. Резчиков, Л.И. Розоноер, Е.Я. Рубинович, В.Ю. Рутковский, акад. ГАН М. Салуквадзе, А.Э. Софиев, акад. РАН Е.А. Федосов, А.Д. Цвиркун

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ (РРС)

ВЛАДИВОСТОК — О.В. Абрамов (4232) 31-02-02

ВОЛГОГРАД — А.А. Воронин (8442) 40-55-06

ВОРОНЕЖ — С.А. Баркалов (4732) 76-40-07

КРАСНОЯРСК — В.В. Огурцов (3912) 27-63-89

КУРСК — С.Г. Емельянов (4712) 50-48-00

ЛИПЕЦК — А.К. Погодаев (4742) 32-80-44

ПЕРМЬ — В.Ю. Столбов (3422) 39-12-97

МИНСК — А.В. Тузиков (10-37517) 284-21-40

САМАРА — В.Г. Засканов (8463) 35-64-07

САРАТОВ — В.А. Твердохлебов (8452) 22-10-42

ТАГАНРОГ — В.М. Курейчик (8634) 39-32-60

ТИРАСПОЛЬ — С.И. Берилл (10-373553) 9-44-87

УФА — Б.Г. Ильясов (3472) 73-78-35



CONTROL SCIENCES

Научно-технический журнал

6 номеров в год
ISSN 1819-3161

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
чл.-корр. РАН
Д.А. Новиков

Заместители главного редактора
Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пашенко

Редактор
Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор
Л.В. Петракова

Издатель
ООО «Сенсидат-Плюс»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: <http://pu.mtas.ru>

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ООО «Адвансед Солюшнз»

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабилова

Отпечатано в ИПУ РАН

Заказ № 82

Подписано в печать
6.08.2012 г.

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»

Цена свободная

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4.2012

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Бурков В.Н., Губко М.В., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями. 2

Анализ и синтез систем управления

Барсегян В.Р. Конструктивный подход к исследованию задач управления линейными составными системами. 11

Управление в социально-экономических системах

Васильев С.Н., Алескеров Ф.Т., Иванов А.А., Якуба В.И. Механизмы принятия экономических решений для утилизации нефтяного попутного газа . . 18

Недовесов М.В., Руденко З.Г. Формирование оптимального портфеля взаимозависимых проектов и его оптимизация по времени 26

Дранко О.И. Экспресс-модель оценки стоимости бизнеса. 32

Угольников Г.А., Усов А.Б. Статические модели коррупции в системах контроля качества водных ресурсов. 38

Информационные технологии в управлении

Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенные блок-схемы для идеальных системных сетей 45

Лукинова О.В. Компьютерная поддержка формирования целей при проектировании защиты информационной системы 52

Пырлина И.В. Выбор эффективного проекта реализации сервис-ориентированной архитектуры информационной системы 59

Управление подвижными объектами и навигация

Елисеев В.Д., Ключев Е.Д., Петрин К.В., **Теряев Е.Д.** Повышение качества директорного управления динамическим объектом 69

Письма в редакцию

Подиновский В.В., Подиновская О.В. Еще раз о некорректности метода анализа иерархий 75

Хроника

Наука управления на пути создания общей теории идентификации объектов управления (по материалам IX международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'12) 79

* * *

Contents & abstracts 84

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ И ДРУГИЕ НАУКИ ОБ УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ¹

В.Н. Бурков, М.В. Губко, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков

Дан анализ места теории управления организационными системами (исторически берущей свое начало в теории активных систем) в системе научных и научно-практических направлений, исследующих организационное управление. В целях этого анализа выбрана единая система классификаций, кратко перечислены современные научные направления, исследующие проблемы теории и практики управления организациями, и, наконец, проведено сравнение теории управления организационными системами с другими теориями.

Ключевые слова: теория управления, организационная система, менеджмент, системный анализ, классификация наук.

ВВЕДЕНИЕ

Теория управления организационными системами (ТУОС) [1, 2] — это научное направление, опирающееся на методологию системного анализа и широко применяющее теоретико-игровое моделирование наряду с методами исследования операций и оптимизации для разработки эффективных инструментов управления организациями различной природы и масштаба — от небольшой фирмы до корпорации, от муниципального образования до государства в целом.

Теория управления организационными системами представляет собой развитие зародившейся в 1960-х гг. в СССР *теории активных систем* (ТАС) — области науки управления, занимающейся управлением в так называемых *активных системах*, элементами которых являются люди, обладающие собственными интересами, способные к самостоятельному выбору действий [3—5]. Исторически сложившийся неформальный центр указанных научных направлений находится в Институте проблем управления РАН, но исследования в этом

русле ведутся и во многих других академических и образовательных институтах (см. обзор истории формирования научной школы ТАС в работе [6]).

Основная задача статьи — позиционировать ТУОС в системе научных и научно-практических направлений, исследующих *организационное управление* или, иначе, *управление организациями* (*организационными системами* — будем далее употреблять эти термины как синонимы, вслед за «Философским энциклопедическим словарем» понимая под организацией объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил).

Для этого:

— выбирается система классификаций научных направлений, делающая возможным их сопоставление;

— кратко перечисляются и классифицируются современные научные направления и теории, исследующие различные проблемы управления организациями;

— в заданных системой классификаций координатах ТУОС сравнивается с другими теориями — показываются их общие черты и различия.

Актуальность подобного рассмотрения обусловлена тем, что, несмотря на большое число на-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00104 и 09-07-00093).



учных школ и направлений, в той или иной мере затрагивающих вопросы организационного управления, на текущий момент имеются лишь немногочисленные исследования, сравнивающие (или противопоставляющие) подходы и методы этих научных школ. В то же время, систематический анализ в этой области мог бы дать немало полезного как для теории (в смысле сопоставления результатов различных теорий), так и для практики (благодаря совместному использованию взаимодополняющих подходов при решении прикладных проблем).

Поэтому решаемые в настоящей статье задачи несколько шире только относительного позиционирования ТУОС. Авторы надеются, что предлагаемая далее классификация может быть полезной и для взаимного позиционирования и других теорий, затрагивающих вопросы организационного управления.

Стоит также признать, что составляющий существенную часть настоящей работы краткий обзор подходов к управлению организациями, очевидно, во многом неполон. Авторы также не отрицают определенной «эгоцентричности» — субъективности их подхода к классификации и перечислению научных школ, а также возможной несбалансированности изложения. Эта несбалансированность обусловлена концентрацией на решении первичной задачи статьи, в результате чего научные теории, более тесно связанные по своим подходам, методам и результатам с ТУОС, получили более широкое освещение. Авторы просят читателей отнестись с пониманием к этой особенности статьи и будут рады получить от них обратную связь в виде конкретных предложений по дополнению описываемой далее картины новыми деталями и связями. Кроме того, следует иметь в виду, что, проводя аналогичную структуризацию, представитель другого (смежного с ТУОС) направления, поставил бы «в центр» и более детально анализировал именно свою науку. Такой субъективизм неизбежен, и лишь совокупность субъективных взглядов, быть может, позволит получить объективную картину.

Настоящая статья развивает и расширяет статью [7] в первую очередь благодаря добавлению ссылок на основные монографии и учебники по тем аспектам обсуждаемых научных направлений, которые имеют отношение к управлению организационными системами, и расширению иллюстративного материала.

Авторы благодарны участникам возглавляемого Д.А. Новиковым общероссийского семинара по ТУОС за обсуждения и полезные советы.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

В настоящем параграфе на основе описанного в книге [8, глава 2] подхода к систематическому описанию методологии научного исследования предлагается классификация наук и научных направлений, занимающихся организационным управлением.

Будем различать *науки* (как отрасли научного знания) и *научные направления* (концепции или теории, создаваемые и развиваемые в рамках тех или иных научных школ, отличающихся понятийным аппаратом, применяемыми методами и принципами организации исследований [8]). Последние обычно представляют собой менее крупные образования и привязаны к конкретному коллективу, организации или традиции. В рамках какой-либо одной науки обычно одновременно существуют конкурирующие и взаимодополняющие друг друга по своим подходам и результатам научные направления.

Научные направления можно классифицировать по их *объекту* (точнее — предмету, так как объект принадлежит, как правило, реальному миру, а предмет является отражением его в теории), *задачам* (функциям) и *методам исследования*.

По своему предмету науки традиционно делятся на естественные (изучающие природу), гуманитарные и общественные (изучающие человека и общество) и технические (исследующие принципы создания и функционирования техники). Отдельно выделяются абстрактные науки, такие как математика, кибернетика, теория систем. Их методы применимы к объектам любой природы. Предмет наук об управлении организациями — организационные системы, т. е. социальные и экономические системы — относится, скорее, к общественным наукам.

В соответствии с работой [8] в задачи (функции) научного исследования входят:

- описание (тех или иных явлений, объектов или процессов);
- объяснение (глубинных причин явлений или процессов, наблюдаемых зависимостей и закономерностей);
- прогноз (развития событий, состояний объектов и процессов),
- выработка рекомендаций (по действиям в той или иной ситуации).

Каждая «следующая» задача исследования обобщает и расширяет «предыдущую». Обычно считается, что для объяснения причин явлений необходимо уметь их описывать, для прогнозирования развития событий — иметь хорошую систему объяснений, для формирования обоснованных рекомендаций — уметь прогнозировать реализацию

многовариантных сценариев, последствия различных вариантов действий и т. д. Однако многие научные направления концентрируются на одном типе задач (например, *многоагентное моделирование* [9] — на задачах прогнозирования; исследование операций — на задачах формирования рекомендаций), и привлекают объясняющие и описательные модели из других наук (в приведенном примере — соответственно психологии и экономики).

Методы исследования обычно делятся на эмпирические (наблюдение, измерение, эксперимент и др.) и теоретические (различные виды абстрагирования и построения моделей — концептуальных, имитационных, математических и др.) [10].

Для более тонкого сравнения научных направлений полезна также следующая их типизация. Согласно дедуктивной теории познания Карла Поппера [11], научное исследование начинается с формулировки проблемы в некоторой предметной области. Затем формулируется гипотеза, идея или модель. Гипотеза исследуется с привлечением тех или иных методов, позволяющих вывести различные следствия. Справедливость полученных выводов проверяется с помощью экспериментов. Выдержавшая проверку гипотеза приобретает статус теории. Эту последовательность можно положить в основание еще одной классификации научных теорий.

Научные теории, занимающиеся изучением единого объекта (предметной области) с привлечением различных моделей и методов, можно назвать «*науками предмета*» (это, пожалуй, наиболее распространенный вариант для прикладных научных направлений).

В то же время некоторые фундаментальные науки (особенно явно это видно на примере математических дисциплин) концентрируются на развитии методов исследования (например, математический анализ, линейное программирование и др.), применимых для изучения различных моделей во многих предметных областях. Такие теории логично называть «*науками метода*».

Построение модели (как конкретизации первоначальной идеи) — наиболее сложная и творческая задача. Поэтому вполне логично желание исследователя распространить плодотворную новую идею, апробированную при решении одной проблемы, на другие проблемы в этой и других предметных областях, а также применить для исследования удачной модели новые методы. Научные направления, эксплуатирующие одну мощную идею или модель, назовем их «*науками модели*», также довольно типичны. Так, будучи еще в начале прошлого века наукой предмета, к настоящему времени экономическая теория превратилась в науку модели и метода, исследующую целенаправлен-

ное поведение людей и коллективов в областях, зачастую далеких от производства и распределения благ.

2. НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, ИССЛЕДУЮЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В настоящем параграфе кратко перечисляются научные направления, в той или иной мере занимающиеся управлением организациями. Объем статьи, к сожалению, не позволяет сделать их содержательного обзора (надеюсь, что приводимые ссылки на современную учебную и монографическую литературу по упоминаемым теориям позволяют хотя бы отчасти сгладить этот недостаток). Цель перечисления состоит лишь в классификации научных направлений для выявления взаимосвязей между ними (рис. 1, третья страница обложки).

По вертикальной оси отложены задачи исследования — описание, объяснение, прогноз, выработка рекомендаций. Горизонтальная ось соответствует предмету исследования — социальным или экономическим системам, институтам или организациям. Пересечение и вложенность предметов отражается пересечением или вложенностью соответствующих им отрезков горизонтальной оси: например, организации являются частным случаем институтов, пересечение социальных и экономических систем дает социально-экономические системы, пересекая соответствующие отрезки можно выделять *экономические институты* или *социальные организации*.

Данные оси задают плоскость, на которой каждое из описываемых научных направлений изображается в виде фигуры более или менее сложной формы. Эта фигура по горизонтали покрывает области, соответствующие предмету научного направления, а по вертикали — области, соответствующие исследовательским задачам, которые ставятся и решаются в рамках этого научного направления на современном этапе его развития.

Как уже отмечалось во Введении, приводимая на рис. 1 (см. третью стр. обложки) диаграмма во многом субъективна и не претендует на полноту (так, например, не выделены в явном виде психология и социология). Ее цель — в едином пространстве наглядно показать взаимосвязи между основными теориями и научными школами, занимающимися управлением организациями. Хотелось бы надеяться, что введение такого пространства и проводимое далее позиционирование ТУОС относительно достаточно большого числа научных направлений позволит читателю самостоятельно добавить на рис. 1 (см. третью стр. обложки) интересующую его научную школу, которая поче-



му-то выпала из рассмотрения, или более детально описать его собственную область исследований.

Центральное ядро современных научных направлений, исследующих организационное управление, составляет «классический» менеджмент (management theory), как во многом эмпирическая и прикладная теория. Это именно та наука, которой, в основном, учат на бизнес-факультетах университетов по всему миру, а также на курсах MBA (Master of Business Administration) и DBA (Doctor of Business Administration). Менеджмент является развитой областью знаний и имеет сложную внутреннюю структуру — по внутренней специализации управленческой работы выделяют: проектное управление [12], управление финансами [13], персоналом, а также другими ресурсами предприятия.

Будучи прикладной областью научного знания, менеджмент концентрируется на выработке рекомендаций по эффективному организационному управлению. Однако используемые для этого прогнозные и объясняющие модели во многом неформальны и зачастую сводятся к перечислению так называемых *бизнес-кейсов* — наблюдений конкретных случаев успешного или неуспешного решения управленческих задач, и лишь иногда — к их эмпирическому обобщению. Поэтому на рис. 1 (см. третью стр. обложки) теория менеджмента изображена гантелевидной фигурой, по горизонтали захватывающей предметную область «организации», а по вертикали имеющей утолщения в областях, соответствующих задачам описания и выработки рекомендаций.

Схожие подходы к исследованию присущи и *теории организации* (см. например, учебник [14]) которая изучает феномен организации в применении как к социальным, так и к экономическим системам. Предмет теории организации даже шире, чем предмет науки менеджмента, так как ее интересует не только прикладной аспект, но и, например, философские вопросы объяснения причин появления различных организационных форм. Поэтому и на рис. 1 (см. третью стр. обложки) фигура, описывающая теорию организации, охватывает область теории менеджмента в сегментах описания и объяснения, но имеет меньший объем в сегменте выработки рекомендаций.

Несколько особняком от этих во многом слабоформализованных областей знания стоит количественная теория менеджмента, называемая в зарубежных исследованиях иногда теоретическим менеджментом (management science) или *исследованием операций*, operations research [15], хотя последний термин часто понимается в более широком смысле (особенно, в отечественной традиции) и обозначает универсальную теорию принятия решений [16].

Более узко исследование операций определяется как наука о рациональном использовании организациями ресурсов, и ее подход основан на формализации принимаемых менеджерами решений, их сведении к тем или иным математическим оптимизационным задачам, и выработке рекомендаций на основе решения этих задач. Как и в «классическом» менеджменте, эти рекомендации основаны на прогностических моделях, однако это уже формальные модели. Соответствующая фигура на рис. 1 (см. третью стр. обложки) находится целиком в сегменте решения задач выработки рекомендаций и частично пересекается с классическим менеджментом.

С наиболее общих позиций проблемы управления организациями рассматриваются в рамках *теории систем* и *системного анализа* [17], изучающих универсальные закономерности существования и развития систем произвольной природы, в том числе, и организаций (на рис. 1 (см. третью стр. обложки) они не изображены, поскольку в силу широты предмета и задач они должны были бы покрыть почти всю плоскость).

В частности, одним из принципов функционирования сложных систем является потребность в связи и управлении. *Кибернетика* — универсальная наука об управлении и связи, для которой организационное управление — одно из многих приложений. Одна из тенденций в кибернетике состоит в переносе подходов и результатов из области управления техническими системами в практику организационного управления (например, решение задач оптимального управления на основе моделей динамики системы, задаваемой с помощью дифференциальных уравнений). Таким образом, кибернетика также ставит и решает задачи формирования рекомендаций. Однако она занимается и поиском общих законов управления, а значит, пусть и в меньшей степени, задачами прогноза, объяснения и даже описания. Соответствующая ей фигура на рис. 1 (см. третью стр. обложки) сильно растягнута по горизонтали, далеко выходя за рамки предмета как социальных, так и экономических систем; по вертикали же она слабо пересекается с сегментом, соответствующим задачам описания явлений, но полностью покрывает оставшиеся три сегмента.

Другой взгляд на проблемы организационного управления дает *экономическая теория*. Предметом *микроэкономики* [18] первоначально являлось рациональное использование ресурсов фирмами и домохозяйствами, однако с развитием *неоинституционализма* [19], в частности, *экономики организаций* (organizational economics) [20] и *теории фирмы* (theory of the firm) (см., например, работу [21]) в фокус внимания попала вся внутрифирменная активность, включая социальные и правовые нор-

мы функционирования фирм. Основные разделы *экономики организаций* — это *теория прав собственности* (property rights theory), исследующая связь между распределением прав собственности на средства производства и эффективностью хозяйственной деятельности, *теория транзакционных издержек* (transaction costs theory), сравнивающая издержки организаций и рынков, а также *теория агентских отношений* (agency theory), исследующая проблемы неполноты информации во взаимодействиях экономических агентов.

Теория агентских отношений, в свою очередь, делится на *теорию контрактов* (contract theory) [22], занимающуюся в основном (но не только) договорами (найма, страхования и т. д.) между Центром (principal) и агентом (agent), и *теорию аукционов* (auction theory) [23], исследующую механизмы взаимодействия «равноправных» экономических агентов на рынках с асимметричной информацией.

Традиционно основной целью микроэкономики считается описание и объяснение явлений, и в меньшей степени — прогноз и рекомендации. Последние обычно рассматриваются через призму нормативного подхода, цель которого заключается в поиске эффективных в смысле общественного блага форм и методов хозяйствования; круг вопросов, интересующих экономистов, выходит далеко за рамки проблем менеджмента. Поэтому и фигуры, соответствующие перечисленным подразделам экономической науки, на рис. 1 (см. третью стр. обложки) лишь частично пересекаются с теорией менеджмента; ее предмет остается в области экономических систем, но покрывает почти весь спектр задач исследования.

Общей математической основой большинства перечисленных экономических теорий служит *теория игр* (game theory), изучающая принятие решений в конфликтных ситуациях [24], в частности, *теория иерархических игр* [25] и *теория механизмов* (mechanism design), исследующие модели, в которых Центр выбирает правила игры для агентов, стремясь добиться от них требуемого поведения. Эти научные направления, и, во многом, теорию игр в целом стоит считать теориями модели, связанными с поиском новых приложений для математических моделей конфликтов. На рис. 1 (см. третью стр. обложки) фигура, описывающая теорию игр, охватывает все предметы исследования, а также задачи прогноза, но лишь частично — объяснения и выработки рекомендаций.

Инструментарий теории игр в настоящее время широко используется многими научными направлениями. В некоторых классификациях она считается разделом теории принятия решений, т. е. подразделом широко понимаемого исследования операций [26]. Так, *информационная теория иерархических систем управления* [27] с помощью

инструментария иерархических игр исследует задачи организационного управления, делая акцент на принятии решений в условиях неопределенности [28].

Теория игр иногда позиционируется как раздел микроэкономики, а в рамках теории игр выделяется раздел, изучающий модели конфликтов, типичные для управления организациями (game theory and management) [29]. Методы теоретико-игрового анализа широко применяются в современной экономической теории для описания целенаправленного поведения индивидуумов и коллективов. Таким образом, именно теория игр стала тем «общим знаменателем», который во многом сблизил язык, терминологию и взгляды кибернетики, неинституционализма, операционного менеджмента и даже политологии.

Примером синтетической математической теории, концентрирующейся на проблемах согласования индивидуальных интересов при принятии коллективных решений, является *теория коллективного выбора* (social choice theory) [30, 31], применяющая те же методы, что и теория агентских отношений, но для решения более специфических задач в более широкой предметной области (см. рис. 1, третья стр. обложки).

Актуальным трендом последних десятилетий является интеграция методов современной психологии, в частности, экспериментов с реальными людьми, в формальные теории принятия решений. Так, практически к любой из перечисленных выше научных теорий можно добавить прилагательные «поведенческий» (behavioral) или «экспериментальный» [32—35] и получить современное научное направление, решающее задачи натурального описания поведения людей в соответствующей предметной области с применением экспериментальных методов психологии и/или социологии (рис. 2, см. третью стр. обложки). В России сегодня также существуют несколько лабораторий экспериментальной экономики в вузах и академических институтах, например, МФТИ и ВЦ РАН [35], ГУ ВШЭ [36], РЭШ [37], ЦЭМИ РАН [38].

Аналогично, потребность во внедрении рекомендаций нормативных теорий в практику менеджмента посредством автоматизации соответствующих управленческих процессов заставляет вплотную заняться проблемами компьютерной реализации, в том числе — численных алгоритмов и их сложности. Соответственно, прилагательное «вычислительный» (computational) или «алгоритмический» (algorithmic) переводит любое из перечисленных выше научных направлений в область вычислительной математики и информатики в аспекте применяемых методов. Примеры — *алгоритмическая теория игр* (algorithmic game theory) и *алгоритмическая теория механизмов* (algorithmic



mechanism design) [39], *вычислительная экономика* (computational economics) [40] и т. п. (см. рис. 2, третья страница обложки).

В частности, развитием системного подхода в направлении имитационного (в основном, компьютерного) моделирования эволюции сложных систем во времени является *системная динамика* (system dynamics) [41], в том числе, *бизнес-динамика* (business dynamics). Подобные методы применяются, в частности, для реализации разработываемых В.Л. Макаровым и его сотрудниками *агентно-ориентированных экономических моделей* [42].

Та же тенденция видна и в методической литературе. Так, многие современные учебники по количественной теории менеджмента сопровождаются лабораторными работами, иллюстрирующими учебный материал вычислительными примерами.

3. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Теоретико-игровое моделирование служит одним из основных методов исследования и в ТУОС [2], сравнению которой с другими научными направлениями посвящена настоящая статья. Как уже отмечалось, ТУОС представляет собой развитие ТАС, зародившейся в 1960-х годах в СССР [3–5].

Теория активных систем позиционируется как область кибернетики, занимающаяся управлением в так называемых *активных системах*. Элементами активных систем являются люди (а также их группы и коллективы), обладающие собственными интересами, способные к самостоятельному выбору действий и искажению информации. Соответственно, предметом ТАС стал систематический учет феномена активности в задачах управления на базе системного подхода, применения методов и использования результатов исследования операций и теории игр.

Теория активных систем (как и следует из ее названия) является скорее не теорией предмета, а теорией модели, эксплуатирующей и развивающей идею *активного поведения* (в теоретико-игровой традиции этой идее соответствует концепция экономического, или стратегического поведения субъектов экономики) в любых социальных, экономических и человеко-машинных системах. Теорией предмета стала ТУОС благодаря включению в ТАС, с одной стороны, моделей и методов исследования операций, дискретной математики и т. д., а с другой стороны, благодаря интеграции собственных наработок в области управленческого консультирования и прикладных результатов экономики, психологии и менеджмента. Основная задача ТУОС заключается в разработке эффективных



Рис. 3. Области приложений ТУОС

механизмов организационного управления, как учитывающих в явном виде, так и игнорирующих целенаправленность управляемых субъектов.

На рис. 1 (см. третью стр. обложки) фигура, изображающая ТУОС, расположена в сегменте решения задач выработки рекомендаций и предмета, связанного с исследованием организаций. С одной стороны, она имеет сильное пересечение с исследованием операций, кибернетикой, с другой — частично пересекается с теорией агентских отношений и другими разделами экономической теории, с теорией механизмов и, в меньшей степени, с теорией коллективного выбора. Как видно из рис. 1 (см. третью стр. обложки), наиболее близкой к ТАС по методологии (системный анализ и кибернетика), предмету (иерархические организационные системы), методам (теория иерархических игр) и задачам является информационная теория иерархических систем управления. Отметим, что еще в 1980-е гг. широкое распространение в ТАС получили экспериментальные исследования, проводимые в форме деловых игр с сотрудниками консультируемых предприятий или реализуемые на основе имитационных моделей (аналогичных моделям многоагентных систем с целенаправленными агентами [41, 42]).

Полученные в ТУОС теоретические результаты использовались при синтезе или модификации механизмов управления многими социально-экономическими системами (рис. 3). По своему масштабу наиболее крупными объектами управления были *регионы*. Для разработки и реализации программ регионального развития применяются методы комплексного оценивания, конкурсные механизмы отбора предприятий в программу регионального развития, методы оптимизации программ по стоимости, механизмы распределения финансовых ресурсов, в том числе, механизмы согласия и экспертные механизмы [43, 44].

Наиболее богатый опыт внедрения накоплен, пожалуй, в области управления *промышленными предприятиями* [45—51]. Совершенствование хозяйственного механизма, реформирование и реструктуризация предприятий и корпоративных структур требуют применения механизмов распределения корпоративных заказов и финансов, в том числе, метода «затраты — эффект», механизмов определения внутренних цен, стимулирования, оперативного управления и опережающего самоконтроля. Отметим и описанный в работе [43] опыт внедрения многоканальных механизмов в автоматизированных системах управления производством.

Еще одной обширной областью приложений стали механизмы *управления проектами*, охватывающие большинство задач управления проектами и работающие на протяжении всего жизненного цикла проекта [52—58]. Другая область — организационные механизмы управления в *эколого-экономических системах*, например, механизмы управления безопасностью сложных систем [59, 60], в том числе — создаваемые в рамках Федеральной Программы «Безопасность». Богатый опыт был накоплен по реализации механизмов управления *развитием приоритетных направлений науки и техники* [61], в частности — разрабатываемых совместно с Минобрнауки РФ. Интересную как с содержательной, так и с методической точки зрения область представляют механизмы управления *образовательными системами*, такие как механизмы управления качеством подготовки специалистов [62].

Новым объектом приложения ТУОС стали активно развивающиеся в Интернете социальные се-

ти. Решение задачи прогнозирования в таких сетях потребовало дополнить наработки ТУОС новыми инструментами анализа, наряду с теоретико-игровыми моделями широко применяющими методы теории графов [63].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечисленные выше приложения свидетельствуют, что результаты ТУОС дают эффективное средство повышения эффективности управления социально-экономическими и организационными системами самого разного масштаба — от бригады и цеха до отрасли и региона. В то же время, практика все время ставит перед специалистами по управлению все новые и новые задачи. Для их решения необходимо установление более тесных содержательных и информационных связей с близкими разделами науки и практики управления, что требует, в первую очередь, сравнения подходов и поиска точек соприкосновения.

Так, подходы к постановке и решению оптимизационных задач организационного управления в ТУОС и в исследовании операций практически идентичны, однако для ТУОС характерен систематический учет целенаправленного поведения объекта управления. Например, методы календарно-сетевого планирования [64] развиваются и в исследовании операций, и в ТУОС, но для решения комплексной прикладной задачи повышения эффективности проектного управления ТУОС дополняет их механизмами распределения ресурса в условиях неопределенности, системами стимулирования встречных планов и мотивации снижения длительности проекта [1, 6] (рис. 4).



Рис. 4. Инструменты управления организационными системами

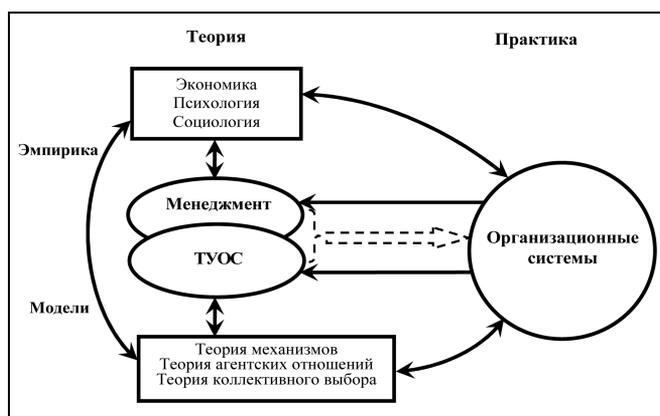


Рис. 5. Теория и практика управления

Предмет теории менеджмента и теории организации совпадает с предметом ТУОС, но методы этих теорий кардинально отличаются. Менеджмент существенно гибче в описании психологических аспектов, в ТУОС же все психологические факторы сводятся к основанной на теории полезности [24] концепции рационального поведения или ограниченной рациональности. Многие выводы менеджмента и теории организации, по сути, дополняют формальный анализ, проводимый в ТУОС, эмпирическими компонентами, не укладывающимися на современном этапе в формальные модели, но не менее необходимыми при практическом внедрении теоретических результатов. Так, например, формальные модели материального стимулирования, развиваемые в ТУОС [2], удачно дополняются многочисленными теориями мотивации [65, 66] и др.

Другой пример интеграции — созданные в ТУОС механизмы комплексного оценивания [6] дают один из инструментов построения систем управления эффективностью компании на основе концепций управления по целям (management by objectives) П. Друкера [67] или сбалансированных систем показателей (balanced scorecards) Р. Нортон и Д. Каплана [68], а механизмы стимулирования операционных улучшений (см. рис. 4) — инструмент мотивационной поддержки программ бережливого производства (lean production) [69].

К развиваемым в рамках ТУОС (а также исследования операций) методам проектного управления [11, 46—52] близка теория ограничений (theory of constraints) Э. Голдратта [70]. Подход к формированию организационных структур Г. Минцберга [71] стал эмпирической основой для математических методов оптимизации иерархических структур управления организациями [72]. И так далее.

С этой точки зрения ТУОС в гармоничном сочетании с менеджментом может служить адекват-

ным «проводником» (см. штриховую стрелку на рис. 5) результатов других научных направлений в практику повышения эффективности управления организационными системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: учебник. — М.: Кн. дом «Либроком»/URSS, 2009.
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами: 2-е изд. — М.: Физматлит, 2007.
3. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977.
4. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. — М.: Наука, 1981.
5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. — М.: СИНТЕГ, 1999.
6. Механизмы управления: учебное пособие / Под ред. Д.А. Новикова. — М.: ЛЕНАНД, 2011.
7. Губко М.В., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Управление организационными системами: современные научные направления // Проблемы теории и практики управления. — 2011. — № 12. — С. 62—71.
8. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. — М.: СИНТЕГ, 2007. — 668 с.
9. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. — N.-Y.: Cambridge University Press, 2008.
10. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. — М.: Либроком, 2010.
11. Поннер К.Р. Логика и рост научного знания: избр. работы. — М.: Прогресс, 1983.
12. Бурков В.Н., Кwon О.Ф., Цитович Л.А. Модели и методы мультипроектного управления. — М.: ИПУ РАН, 1998.
13. Copeland T.E., Weston J.F. Financial Theory and Corporate Policy. — Boston: Pearson; Addison-Wesley, 2005.
14. Мильнер Б.З. Теория организации: учебник: 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2000.
15. Hillier F.S., Lieberman G.J. Introduction to Operations Research: 8th (International) Edition. — Boston: McGraw-Hill, 2005.
16. Шикин Е.В., Шикина Г.Е. Исследование операций. — М.: Проспект, 2006.
17. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высшая школа, 1989.
18. Mas-Colell A., Whinston M.D., Green J.R. Microeconomic theory. — N.-Y.: Oxford University Press, 1995.
19. The Handbook of New Institutional Economics / Ed. by C. Ménard, and M.M. Shirley. — Dordrecht: Springer, 2005.
20. Milgrom P., Roberts J. The Economics, Organization and Management. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
21. Williamson O.E. Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications. — N.-Y.: The Free Press, 1975.
22. Bolton P., Dewatripont M. Contract Theory. — Cambridge: MIT Press, 2005.
23. Krishna V. Auction Theory: 2nd Edition. — Burlington, MA: Academic Press, 2009.
24. Myerson R. B. Game Theory: Analysis of Conflict. — London: Harvard University Press, 1991.
25. Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. — М.: Наука, 1976.
26. Муссеев Н.Н. Элементы оптимальных систем. — М.: Наука, 1975.

27. Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. — М.: Радио и связь, 1991.
 28. Кононенко А.Ф., Халезов А.Д., Чумаков В.В. Принятие решений в условиях неопределенности. — М.: ВЦ РАН, 1991.
 29. *Decision & Control in Management Science: Essays in Honor of Alan Haurie* / Ed. by J. Zaccour. — Boston—Dordrecht—London: Kluwer Academic Publishers, 2002.
 30. *Nitzan S. Collective Preference and Choice*. — Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
 31. *Danilov V.I., Sotskov A.I. Social Choice Mechanisms*. — Berlin: Springer-Verlag, 2002.
 32. *Baron R.A., Greenberg J. Behavior in Organizations: 9th Edition*. — NJ: Pearson Education Inc., 2008.
 33. *Camerer C.F. Behavioral Game Theory: Experiments in Strategic Interactions*. — Princeton: Princeton University Press, 2003.
 34. *Syert R., March J.G. A Behavioral Theory of the Firm*. — NJ: Prentice-Hall Inc, 1963.
 35. *Экспериментальная экономика* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.eelab.ru>.
 36. *Лаборатория экспериментальной и поведенческой экономики: НИУ ВШЭ* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://epee.hse.ru>.
 37. *Лаборатория экспериментальной экономики РЭШ* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fir.nes.ru/~abremzen/experiments>.
 38. *Лаборатория экспериментальной экономики ЦЭМИ РАН* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.cemi.rssi.ru/structure/science_divisions/lab101.php.
 39. *Algorithmic Game Theory* / Ed. Nisan N., Roughgarden T., Tardos E., and Vazirani V.V. — N.-Y.: Cambridge University Press, 2009.
 40. *Handbook of Computational Economics* / Ed. by H.M. Amman, D.A. Kendrick, J. Rust. — Amsterdam: North-Holland, 1996.
 41. *Sterman J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. — Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill, 2000.
 42. *Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики*. — М.: Экономика, 2008.
 43. *Многоканальные организационные механизмы* / В.П. Авдеев, В.Н. Бурков, А.К. Еналеев, Т.В. Киселева. — М.: ИПУ РАН, 1986.
 44. *Гилев С.Е., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Распределенные системы принятия решений в управлении региональным развитием*. — М.: ИПУ РАН, 2002.
 45. *Модели и методы оптимизации региональных программ развития* / Н.Г. Андронникова, С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, А.М. Котенко. — М.: ИПУ РАН, 2001.
 46. *Модели и механизмы внутрифирменного управления* / И.К. Ануфриев, В.Н. Бурков, Н.И. Вилкова, С.Т. Рапацкая. — М.: ИПУ РАН, 1994.
 47. *Бурков В.Н., Трапезова М.Н. Механизмы внутрифирменного управления*. — М.: ИПУ РАН, 2000.
 48. *Щепкин А.В. Механизмы внутрифирменного управления*. — М.: ИПУ РАН, 2001.
 49. *Заложнев А.Ю. Модели и методы внутрифирменного управления*. — М.: Сторм-Медиа, 2004.
 50. *Иващенко А.А., Новиков Д.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы*. — М.: КомКнига, 2006.
 51. *Модели и методы материального стимулирования: теория и практика* / О.Н. Васильева, В.В. Засканов, Д.Ю. Иванов, Д.А. Новиков. — М.: Ленанд, 2007.
 52. *Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами*. — М.: СИНТЕГ, 1997.
 53. *Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М. Методы агрегирования в управлении проектами*. — М.: ИПУ РАН, 1999.
 54. *Типовые решения в управлении проектами* / Д.К. Васильев, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков, А.В. Цветков — М.: ИПУ РАН, 2003.
 55. *Гламаздин Е.С., Новиков Д.А., Цветков А.В. Механизмы управления корпоративными программами: информационные системы и математические модели*. — М.: Спутник, 2004.
 56. *Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В. Модели и методы управления портфелями проектов*. — М.: ПМСОФТ, 2005.
 57. *Новиков Д.А. Управление проектами: организационные механизмы*. — М.: ПМСОФТ, 2007.
 58. *Цветков А.В. Стимулирование в управлении проектами*. — М.: Апостроф, 2001.
 59. *Бурков В.Н., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. Модели и методы управления безопасностью*. — М.: СИНТЕГ, 2001.
 60. *Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Механизмы управления эколого-экономическими системами*. — М.: Физматлит, 2008.
 61. *Кузьмицкий А.А., Новиков Д.А. Организационные механизмы управления развитием приоритетных направлений науки и техники*. — М.: ИПУ РАН, 1993.
 62. *Новиков Д.А. Теория управления образовательными системами*. — М.: Народное образование, 2009.
 63. *Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства*. — М.: Физматлит, 2010.
 64. *Kelley J. Critical Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis // Operations Research*. — 1961. — Vol. 9, N 3. — P. 296—320.
 65. *Herzberg F., Mausner B. The Motivation to Work*. — New Brunswick: Transaction Publishers, 1993.
 66. *Ouchi W.G. Theory Z: How American Business Can Meet the Japanese Challenge*. — Reading, MA: Addison-Wesley, 1981.
 67. *Drucker P. The Effective Executive: The Definitive Guide to Getting the Right Things Done*. — N.-Y.: Collins Business, 2006.
 68. *Kaplan R.S. Norton D.P. Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. — Harvard: Harvard Business School Press, 1996.
 69. *Ohno T. Toyota Production System*. — N.-Y.: Productivity Press, 1988.
 70. *Goldratt E.M. Essays on the theory of constraints*. — Great Barrington: North River Press, 1990.
 71. *Mintzberg H. Structure in Fives: Designing Effective Organizations*. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
 72. *Мишин С.П. Оптимальные иерархии управления в экономических системах*. — М.: ПМСОФТ, 2004.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Т. Алексеровым.*
- Бурков Владимир Николаевич** — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ☎ (495) 334-79-00, ✉ vlab17@bk.ru,
- Губко Михаил Владимирович** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-90-51, ✉ mgoubko@mail.ru,
- Коргин Николай Андреевич** — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-79-00, ✉ nkorgin@ipu.ru,
- Новиков Дмитрий Александрович** — чл.-корр. РАН, зам. директора, ☎ (495) 334-75-69, ✉ novikov@ipu.ru,
- Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва.

КОНСТРУКТИВНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ СОСТАВНЫМИ СИСТЕМАМИ

В.Р. Барсегян

Рассмотрена математическая модель управления линейными составными системами, описываемыми на разных интервалах времени разными дифференциальными уравнениями и некоторыми конечными связями для преемственности движения составных систем. Построен аналитический вид движения составных систем, исследованы свойства движения и геометрическая структура области достижимости. Сформулированы необходимые и достаточные условия вполне управляемости. Предложен метод решения задачи управления составными системами и способ решения задачи оптимального управления, сформулированы условия существования программного управления и движения.

Ключевые слова: составная система, вполне управляемость, оптимальное управление, область достижимости, условия преемственности движения.

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих прикладных задач и процессов управления, выбор программных траекторий и управления сводится к управлению составными системами.

Следуя работам [1, 2], составной будем называть динамическую систему, описываемую на разных интервалах времени разными дифференциальными уравнениями и некоторыми конечными связями для стыковки траекторий.

Составные системы встречаются в различных прикладных задачах авиастроения, робототехники, электроэнергетики и др. Математическая модель составной системы возникает, в частности, при исследовании процессов управления с учетом взаимодействия объекта управления со средой в соответствии с некоторыми физическими законами, проявляющимися в дискретные моменты времени.

Составная система может быть получена также при кусочно-линейной аппроксимации сложной системы нелинейных дифференциальных уравнений. Поэтому решение различных задач управления нелинейной динамической системой, таким

образом, может быть аппроксимировано решениями аналогичных задач для составной системы.

Исследование и решение различных задач управления составными системами имеют важное теоретическое и прикладное значение, расширяют область применения соответствующей математической теории. В частности, в докладе [3] математические модели подобных систем, их поведение и вопросы управления. В работах [1, 2] приведены необходимые условия оптимальности составных систем. В статье [4] исследовано решение задачи оптимального управления линейными гибридными системами (в дискретном времени) с квадратичным критерием качества. Работа [5] посвящена качественному анализу кусочно-линейных динамических систем.

Настоящая статья посвящена исследованию некоторых свойств движения составных систем, в частности, поиску явного аналитического вида движения, формулировке необходимого и достаточного условий вполне управляемости, разработке метода решения задачи управления линейными составными системами и способа решения задачи оптимального управления, а также формулировке условий существования программного управления и движения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим управляемую составную динамическую систему, движение которой на интервале времени $t_{k-1} \leq t \leq t_k$, $k = 1, \dots, m$, описывается n_k -мерной системой

$$\dot{x}^{(k)} = A_k(t)x^{(k)} + B_k(t)u^{(k)}. \quad (1.1)$$

Здесь $x^{(k)}(t) \in R^{n_k}$, $x^{(k)}$ — фазовый вектор системы; $A_k(t)$ и $B_k(t)$, $k = 1, \dots, m$, — матрицы параметров системы (модели объекта) размерностями $(n_k \times n_k)$ и $(n_k \times r_k)$ соответственно; $u^{(k)}(t)$ — $(r_k \times 1)$ -вектор управляющих воздействий. В общем случае будем предполагать, что элементы матриц $A_k(t)$ и $B_k(t)$ и компоненты вектор-столбцов $u^{(k)}(t)$ являются измеримыми ограниченными функциями.

Предполагается, что заданы промежуточные моменты времени $0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_{m-1} < t_m = T$.

Пусть заданы начальное

$$x^{(1)}(t_0) = x_0^{(1)} \quad (1.2)$$

и конечное

$$x^{(m)}(T) = x_T^{(m)} \quad (1.3)$$

состояния системы.

Преимственность между составными системами (1.1) при $k = 1, \dots, m$ (стыковки траекторий) обеспечивается выполнением следующих условий в промежуточные моменты времени t_k , $k = 1, \dots, m - 1$:

$$E_k x^{(k)}(t_k) + F_k x^{(k+1)}(t_k) = \alpha_k, \quad (1.4)$$

где E_k — $(n_{k+1} \times n_k)$ -мерные, F_k — $(n_{k+1} \times n_{k+1})$ -мерные матрицы, а α_k — $(n_{k+1} \times 1)$ -мерный вектор-столбец.

Предполагается, что матрицы E_k , F_k и вектор α_k известны, а матрицы F_k такие, что существуют обратные матрицы F_k^{-1} , т. е. $\det F_k \neq 0$.

Рассмотрим следующие задачи.

Задача 1. Требуется найти условия, при которых существуют программные управляющие воздействия $u^{(k)}(t)$, $k = 1, \dots, m$, переводящие движение составной системы (1.1) $x^{(k)}(t)$ из начального состояния (1.2), при условии (1.4), в конечное состояние (1.3) на промежутке времени $[t_0, T]$, а также построить их. ♦

Пусть для отбора оптимальных решений на промежутке времени $[t_0, T]$ задан некоторый кри-

терий качества $\mathfrak{e}[u]$, где u — набор управляющих воздействий, т. е. $u = \{u^{(1)}(t), \dots, u^{(k)}(t) | u^{(i)}(t) \in P_i, i = 1, \dots, k\}$, который может иметь смысл нормы некоторого нормированного пространства.

Задачу оптимального управления для системы (1.1) с условиями (1.2)—(1.4) и критерием качества $\mathfrak{e}[u]$ можно сформулировать следующим образом.

Задача 2. Требуется найти набор оптимальных управляющих воздействий $u^0(t) = \{u^{(1)0}(t), \dots, u^{(m)0}(t)\}$, $t \in [t_0, T]$, который переводит движение системы (1.1) из начального состояния (1.2) при условии (1.4) в конечное состояние (1.3) и имеет наименьшее возможное значение критерия качества $\mathfrak{e}[u^0]$.

2. ПОСТРОЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ СОСТАВНОЙ СИСТЕМЫ

Для решения поставленных задач построим движение составной системы (1.1) с условиями (1.2). Для этого напишем решение системы (1.1) для промежутка времени $[t_0, t_1]$ в виде [6]

$$x^{(1)}(t) = X_1[t_0, t_1]x^{(1)}(t_0) + \int_{t_0}^t H_1[t, \tau]u^{(1)}(\tau)d\tau, \quad (2.1)$$

а для моментов времени $t \geq t_k$, $k = 1, \dots, m - 1$, представим его в виде

$$x^{(k+1)}(t) = X_{k+1}[t, t_k]x^{(k+1)}(t_k) + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau]u^{(k+1)}(\tau)d\tau, \quad (2.2)$$

где $H_k[t, \tau] = X_k[t, \tau]B_k[\tau]$, а через $X_k[t, \tau]$ обозначена нормированная фундаментальная матрица решения однородной части уравнения (1.1) на промежутке времени $[t_{k-1}, t_k]$.

Учитывая условия преимственности составных систем, из уравнения (1.4) получим

$$x^{(k+1)}(t_k) = F_k^{-1}(\alpha_k - E_k x^{(k)}(t_k)). \quad (2.3)$$

Подставляя выражение (2.3) в решение (2.2), получаем

$$x^{(k+1)}(t) = X_{k+1}[t, t_k]F_k^{-1}\alpha_k - X_{k+1}[t, t_k]F_k^{-1}E_k x^{(k)}(t_k) + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau]u^{(k+1)}(\tau)d\tau. \quad (2.4)$$



В формуле (2.4) при $k = 1$ и после подстановки выражения $x^{(1)}(t_1)$ из (2.1) получим

$$x^{(2)}(t) = X_2[t, t_1] F_1^{-1} \alpha_1 - X_2[t, t_1] F_1^{-1} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) - X_2[t, t_1] F_1^{-1} E_1 \int_{t_0}^{t_1} H_1[t_1, \tau] u^{(1)}(\tau) d\tau + \int_{t_1}^t H_2[t, \tau] u^{(2)}(\tau) d\tau.$$

Если в формуле (2.4) $k \geq 2$, то, записывая формулу (2.2) для предыдущей составной системы (т. е. для промежутка времени $[t_{k-1}, t_k]$), при $t = t_k$ будем иметь

$$x^{(k)}(t_k) = X_k[t_k, t_{k-1}] x^{(k)}(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} H_k[t_k, \tau] u^{(k)}(\tau) d\tau. \quad (2.5)$$

Из условия (1.4) получим

$$x^{(k)}(t_{k-1}) = F_{k-1}^{-1} (\alpha_{k-1} - E_{k-1} x^{(k-1)}(t_{k-1})). \quad (2.6)$$

Учитывая формулы (2.5) и (2.6), запишем выражение (2.4) в виде

$$x^{(k+1)}(t) = X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \alpha_k - X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} E_k X_k[t_k, t_{k-1}] F_{k-1}^{-1} \alpha_{k-1} + X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} E_k X_k[t_k, t_{k-1}] F_{k-1}^{-1} E_{k-1} x^{(k-1)}(t_{k-1}) - X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} E_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} H_k[t_k, \tau] u^{(k)}(\tau) d\tau + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau] u^{(k+1)}(\tau) d\tau.$$

Продолжая эту процедуру для предыдущих промежутков времени, с учетом условия преемственности составных систем, до достижения промежутка времени $[t_0, t_1]$ и учитывая начальное условие (1.2) для фазового состояния $x^{(k+1)}(t)$, получим следующее выражение:

$$x^{(k+1)}(t) = X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \left\{ (-1)^k \prod_{j=1}^{k-1} E_{k+1-j} \times X_{k+1-j}[t_{k+1-j}, t_{k-j}] F_{k-j}^{-1} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) + (-1)^{k-1} \prod_{j=1}^{k-1} E_{k+1-j} X_{k+1-j}[t_{k+1-j}, t_{k-j}] F_{k-j}^{-1} \alpha_1 + (-1)^{k-2} \prod_{j=1}^{k-2} E_{k+1-j} X_{k+1-j}[t_{k+1-j}, t_{k-j}] \times \right.$$

$$\left. \times F_{k-j}^{-1} \alpha_2 + \dots + \alpha_k \right\} + X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \times \left\{ (-1)^k \prod_{j=1}^{k-1} E_{k+1-j} X_{k+1-j}[t_{k+1-j}, t_{k-j}] F_{k-j}^{-1} \times E_1 \int_{t_0}^{t_1} H_1[t_1, \tau] u^{(1)}(\tau) d\tau + (-1)^{k-1} \prod_{j=1}^{k-2} E_{k+1-j} X_{k+1-j} \times \int_{t_0}^{t_1} H_1[t_1, \tau] u^{(1)}(\tau) d\tau + (-1)^{k-1} \prod_{j=1}^{k-2} E_{k+1-j} X_{k+1-j} \times \int_{t_1}^{t_2} H_2[t_2, \tau] u^{(2)}(\tau) d\tau + \dots + (-1)^k E_k \int_{t_{k-1}}^{t_k} H_k[t_k, \tau] u^{(k)}(\tau) d\tau \right\} + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau] u^{(k+1)}(\tau) d\tau.$$

Введя обозначения

$$W_i^{(k)} = \prod_{j=1}^{k-i} E_{k+1-j} X_{k+1-j}[t_{k+1-j}, t_{k-j}] F_{k-j}^{-1},$$

$$k = 2, 3, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, k-1,$$

полученное выражение для фазового состояния $x^{(k+1)}(t)$ запишем в виде

$$x^{(k+1)}(t) = X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \left[\sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_i + (-1)^k W_i^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) \right] + X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \times \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_i, \tau] u^{(i)}(\tau) d\tau + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau] u^{(k+1)}(\tau) d\tau. \quad (2.7)$$

Здесь размерность матрицы $W_i^{(k)}$ равна $(n_{k+1} \times n_{k+1})$ и принято, что при $i = k$ $W_k^{(k)} = E$ — единичная матрица размерностью $(n_{k+1} \times n_{k+1})$.

Таким образом, имея начальное состояние $x^{(1)}(t_0)$ (1.2), условия стыковки (преемственности) фазовой траектории (1.4) и задавая управляющие воздействия $u^{(i)}(t)$, $i = 1, \dots, k$, с помощью формулы (2.7) можно определить фазовое состояние системы (1.1) для произвольного момента времени t из любого промежутка времени $[t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, m$.

3. О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ДВИЖЕНИЯ СОСТАВНОЙ СИСТЕМЫ

Формула (2.7) представляет явный аналитический вид движения составной системы (1.1). В силу ограниченности множеств P_k , $k = 1, \dots, m$, из выражения (2.7) непосредственно следует, что решение $x^{(k)}(t)$ представляет собой действительный, абсолютно непрерывный n_k -мерный вектор на R^{n_k} [7].

К качественным аспектам теории управления принадлежит понятие области (множества) достижимости управляемого движения. Эти множества тесно связаны с различными задачами управления и многие результаты теории управления можно получить, изучая геометрическую структуру области достижимости [8, 9].

Пусть имеем $u^{(k)}(t) \in P_k$, $k = 1, \dots, m$ — набор управлений, определяемых на промежутках времени $[t_{k-1}, t_k]$.

Совокупность всех решений системы (1.1), которые имеют явный вид (2.7), обозначим через $X(t_0, x_0^{(1)}, t, \{t_p, u^{(i)}, E_p, F_p, \alpha_i | i = 1, 2, \dots, k\})$.

Определение. Множество

$$K(t_0, x_0^{(1)}, \bar{t}) = \{x^{(k+1)}(\bar{t}) \in R^{n_{k+1}} | x^{(k+1)}(\cdot) \in X(t_0, x_0^{(1)}, t, \{t_p, u^{(i)}, E_p, F_p, \alpha_i | i = 1, 2, \dots, k+1\})\}$$

будем называть областью достижимости составной системы (1.1) в момент времени $\bar{t} \in [t_k, t_{k+1}]$, отвечающей начальному условию (1.2), набору управлений $u^{(k)}(t) \in P_k$ и условию стыковки траекторий (1.3). ♦

Набор управления $u^{(k)}(t)$ составляют все управления $u^{(i)}(t) \in P_i$, $t \in [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, \dots, k$, т. е. $u^{(k)}(t) = \{u^{(1)}(t), \dots, u^{(k)}(t) | u^{(i)}(t) \in P_i, i = 1, \dots, k\}$.

Основные свойства области достижимости составной системы формулируются в следующей теореме.

Теорема 1. Область достижимости $K(t_0, x_0^{(1)}, \bar{t})$ составной системы (1.1) является компактной, выпуклой и непрерывно зависит от \bar{t} при $\bar{t} \in [t_k, t_{k+1}]$, $k = 1, \dots, m - 1$.

Доказательство. Для краткости записи множества достижимости, в ее обозначении будем опускать все величины, кроме конечного момента времени \bar{t} . Чтобы доказать, что область $K(\bar{t})$, $\bar{t} \in [t_k, t_{k+1}]$ является компактным множеством покажем, что оно ограничено и замкнуто в $R^{n_{k+1}}$.

В силу ограниченности множеств P_k , $k = 1, \dots, m$, из равенства (2.7) непосредственно следует ограниченность области достижимости $K(\bar{t})$.

Чтобы доказать замкнутость множества $K(\bar{t})$ в множестве $R^{n_{k+1}}$, покажем, что из любой последовательности точек $x_1^{(k+1)}(\bar{t}), x_2^{(k+1)}(\bar{t}), \dots, x_j^{(k+1)}(\bar{t}), \dots$ в $K(\bar{t})$ можно выделить подпоследовательность, сходящуюся к некоторой предельной точке $\bar{x}(\bar{t})$ в $K(\bar{t})$.

Рассмотрим соответствующие решения $x_j^{(k+1)}(\bar{t})$, $j = 1, 2, 3, \dots$, и наборы управлений $u_1^{(k+1)}(\bar{t}), u_2^{(k+1)}(\bar{t}), \dots, u_j^{(k+1)}(\bar{t}), \dots$

Из равенства (2.7) имеем, что для всех $j = 1, 2, 3, \dots$ справедливо

$$\begin{aligned} x_j^{(k+1)}(\bar{t}) = & X_{k+1}[\bar{t}, t_k] F_k^{-1} \left[\sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_i + \right. \\ & \left. + (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) \right] + X_{k+1}[\bar{t}, t_k] F_k^{-1} \times \\ & \times \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_p, \tau] u_j^{(i)}(\tau) d\tau + \\ & + \int_{t_k}^{\bar{t}} H_{k+1}[\bar{t}, \tau] u_j^{(k+1)}(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $u_j^{(i)}(\cdot) \in P_i$, $i = 1, 2, \dots, k+1$. Из слабой компактности множества P_i [10] следует, что из последовательности наборов функций $\{u_j^{(i)}(\cdot), i = 1, \dots, k+1\}$ можно выделить подпоследовательность, слабо сходящуюся к набору функции $\bar{u}_j^{(i)}(\cdot) \in P_i$, $i = 1, 2, \dots, k+1$. Переходя к пределу по подходящей подпоследовательности индексов в выражении (3.1), получим

$$\begin{aligned} \bar{x}^{(k+1)}(\bar{t}) = & X_{k+1}[\bar{t}, t_k] F_k^{-1} \left[\sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_i + \right. \\ & \left. + (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) \right] + X_{k+1}[\bar{t}, t_k] F_k^{-1} \times \\ & \times \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_p, \tau] \bar{u}^{(i)}(\tau) d\tau + \\ & + \int_{t_k}^{\bar{t}} H_{k+1}[\bar{t}, \tau] \bar{u}^{(k+1)}(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Равенство (3.2) означает, что $\bar{x}^{(k+1)}(\bar{t}) \in K(\bar{t})$, т. е. следует замкнутость области достижимости составной системы.

Для доказательства выпуклости множества $K(\bar{t})$ покажем, что отрезок

$$(1 - \lambda)x_{(1)}^{(k+1)}(\bar{t}) + \lambda x_{(2)}^{(k+1)}(\bar{t}), \quad 0 \leq \lambda \leq 1,$$



соединяющий две фазовые точки $x_{(1)}^{(k+1)}(\bar{t})$ и $x_{(2)}^{(k+1)}$, весь лежит в $K(\bar{t})$. Пусть $u_{(1)}^{(k+1)}(t)$ и $u_{(2)}^{(k+1)}(t)$ — два набора управлений, соответствующих решениям $x_{(1)}^{(k+1)}(\bar{t})$ и $x_{(2)}^{(k+1)}$. Определим набор управления $u_{\lambda}^{(k+1)}(t) \subset P_i$, $t_0 \leq t \leq \bar{t}$, таким образом, чтобы для каждого промежутка времени $[t_{i-1}, t_i]$ имело место соотношение

$$u_{\lambda}^{(i)}(t) = (1 - \lambda)u_{(1)}^{(i)}(t) + \lambda u_{(2)}^{(i)}(t), \quad i = 1, \dots, k + 1.$$

Движение $x_{\lambda}^{(k+1)}$, соответствующее набору управлений $\{u_{\lambda}^{(i)}(t), i = 1, \dots, k + 1\}$, имеет вид

$$\begin{aligned} x_{\lambda}^{(k+1)}(t) = & X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \left[\sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_i + \right. \\ & \left. + (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) \right] + X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \times \\ & \times \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_i, \tau] u_{\lambda}^{(i)}(\tau) d\tau + \\ & + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau] u_{\lambda}^{(k+1)}(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} x_{\lambda}^{(k+1)}(t) = & (1 - \lambda) \left\{ X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \left[\sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_i + \right. \right. \\ & \left. \left. + (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) \right] + X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \times \right. \\ & \times \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_i, \tau] u_{(1)}^{(i)}(\tau) d\tau + \\ & \left. + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau] u_{(1)}^{(k+1)}(\tau) d\tau \right\} + \lambda \left\{ X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \times \right. \\ & \times \left[\sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_i + (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) \right] + \\ & + X_{k+1}[t, t_k] F_k^{-1} \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_i, \tau] u_{(2)}^{(i)}(\tau) d\tau + \\ & \left. + \int_{t_k}^t H_{k+1}[t, \tau] u_{(2)}^{(k+1)}(\tau) d\tau \right\}, \end{aligned}$$

и поэтому

$$x_{\lambda}^{(k+1)}(t) = (1 - \lambda)x_{(1)}^{(k+1)}(\bar{t}) + \lambda x_{(2)}^{(k+1)}(\bar{t}),$$

т. е. $K(\bar{t})$ — выпуклое множество.

Теперь изучим зависимость множеств $K(\bar{t})$ от \bar{t} при $\bar{t} \in [t_k, t_{k+1}]$, $k = 1, \dots, m - 1$. Покажем, что для любого $\varepsilon > 0$ найдется $\delta > 0$ такое, что расстояние между мно-

жествами $K(\bar{t})$ и $K(\bar{\bar{t}})$ становится меньше ε , как только $|\bar{t} - \bar{\bar{t}}| < \delta$. Здесь расстояние между множествами $K(\bar{t})$ и $K(\bar{\bar{t}})$ понимается по метрике Хаусдорфа [10].

Пусть $\tilde{u}(t) = \{\tilde{u}^{(i)} \in P_i, i = 1, \dots, k + 1\}$ — набор управлений, которому соответствует движение $\tilde{x}^{(k+1)}(t)$ составной системы (1.1).

Тогда для моментов времени \bar{t} и $\bar{\bar{t}}$ из промежутка $[t_k, t_{k+1}]$, вычисляя разность фазовых состояний $\tilde{x}^{(k+1)}(\bar{\bar{t}}) - \tilde{x}^{(k+1)}(\bar{t})$ согласно формуле (2.7), получим

$$\begin{aligned} \tilde{x}^{(k+1)}(\bar{\bar{t}}) - \tilde{x}^{(k+1)}(\bar{t}) = & \{X_{k+1}[\bar{\bar{t}}, t_k] - X_{k+1}[\bar{t}, t_k]\} \times \\ & \times F_k^{-1} \left\{ (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) + \right. \\ & + \sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_k + \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \times \\ & \times \left. \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_i, \tau] \tilde{u}^{(i)}(\tau) d\tau \right\} + \int_{t_k}^{\bar{\bar{t}}} H_{k+1}[\bar{\bar{t}}, \tau] \tilde{u}^{(k+1)}(\tau) d\tau - \\ & - \int_{t_k}^{\bar{t}} H_{k+1}[\bar{t}, \tau] \tilde{u}^{(k+1)}(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Поскольку матрицы $X_i[t, \tau]$ и $H_i[t, \tau]$, $i = 1, \dots, k + 1$, ограничены по норме, а интеграл есть непрерывная функция пределов интегрирования, то получим следующие оценки:

$$\begin{aligned} \left\| (-1)^k W_1^{(k)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0) + \sum_{i=1}^k (-1)^{k-i} W_i^{(k)} \alpha_k + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^k (-1)^{k+1-i} W_i^{(k)} E_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} H_i[t_i, \tau] \tilde{u}^{(i)}(\tau) d\tau \right\| < \frac{\varepsilon}{3C}, \end{aligned}$$

$$\|X_{k+1}[\bar{\bar{t}}, t_k] - X_{k+1}[\bar{t}, t_k]\| < C,$$

$$\left\| \int_{t_k}^{\bar{\bar{t}}} H_{k+1}[\bar{\bar{t}}, \tau] \tilde{u}^{(k+1)}(\tau) d\tau \right\| < \frac{\varepsilon}{3},$$

$$\left\| \int_{t_k}^{\bar{t}} H_{k+1}[\bar{t}, \tau] \tilde{u}^{(k+1)}(\tau) d\tau \right\| < \frac{\varepsilon}{3}$$

для заданного $\varepsilon > 0$ и $|\bar{t} - \bar{\bar{t}}| < \delta$, если δ выбрать достаточно малым, где C — некоторая постоянная.

Таким образом, для $|\bar{t} - \bar{\bar{t}}| < \delta$ имеем

$$\|\tilde{x}^{(k+1)}(\bar{\bar{t}}) - \tilde{x}^{(k+1)}(\bar{t})\| < \frac{\varepsilon}{3C} C + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon. \quad (3.3)$$

Пусть точка $\tilde{x}^{(k+1)}(\bar{t}) \in K(\bar{t})$ соответствует набору управлений $\tilde{u}^{(k+1)}(t)$ на интервале $t_0 \leq t \leq \bar{t}$. Определим набор управлений $\tilde{u}^{(k+1)}(t)$ на интервале $t_0 \leq t \leq \bar{\bar{t}}$ и

пусть $\tilde{x}^{(k+1)}(t)$ будет соответствующим ему решением, тогда $\tilde{x}^{(k+1)}(\bar{t}) \in K(\bar{t})$ и имеет место неравенство (3.3). С другой стороны, если $\tilde{x}^{(k+1)}(\bar{t}) \in K(\bar{t})$, соответствующее набору управлений $\tilde{u}^{(k+1)}(t)$ на интервале $t_0 \leq t \leq \bar{t}$, то, определяя набор управлений на интервале $t_0 \leq t \leq \bar{t}$, получим выражение (3.3).

Приведенные рассуждения показывают, что расстояние между множествами $K(\bar{t})$ и $K(\bar{t})$ меньше ε , как только $|\bar{t} - \bar{t}| < \delta$, где δ зависит от ε . Таким образом, область достижимости $K(\bar{t})$ непрерывно зависит от момента времени \bar{t} . Теорема 1 доказана.

4. РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Из формулы (2.7) при $k = m - 1$ и $t = t_m = T$ получим

$$\begin{aligned}
 & X_m[T, t_{m-1}] F_{m-1}^{-1} \sum_{i=1}^{m-1} (-1)^{m+1-i} W_i E_i \times \\
 & \quad \times \int_{t_i}^{t_i} H_i[t_i, \tau] u^{(i)}(\tau) d\tau + \\
 & \quad + \int_{t_{m-1}}^T H_m[T, \tau] u^{(m)}(\tau) d\tau = \eta, \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 \eta &= x^{(m)}(T) - X_m[T, t_{m-1}] \times \\
 & \times F_{m-1}^{-1} \sum_{i=1}^{m-1} (-1)^{m-i} W_i^{(m-1)} \alpha_i - (-1)^m X_m[T, t_{m-1}] \times \\
 & \times F_{m-1}^{-1} W_1^{(m-1)} E_1 X_1[t_1, t_0] x^{(1)}(t_0). \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

Отметим, что здесь число соотношений равно n_m , а η — известный вектор.

Теперь в выражение (4.1) вместо функций $H_i[t_i, \tau]$, $i = 2, \dots, m$, введем функции $\bar{H}_i[t_i, \tau]$ следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \bar{H}_1[t_1, \tau] &= \begin{cases} H_1[t_1, \tau] & \text{при } t_0 \leq \tau \leq t_1, \\ 0 & \text{при } t_1 < \tau \leq t_m = T, \end{cases} \\
 \bar{H}_i[t_i, \tau] &= \begin{cases} 0 & \text{при } t_0 \leq \tau < t_{i-1}, \\ H_i[t_i, \tau] & \text{при } t_{i-1} \leq \tau \leq t_i, \\ 0 & \text{при } t_i < \tau \leq t_m = T, \end{cases} \quad i = 2, \dots, m-1, \\
 \bar{H}_m[t_m, \tau] &= \begin{cases} 0 & \text{при } t_0 \leq \tau < t_{m-1}, \\ H_m[T, \tau] & \text{при } t_{m-1} \leq \tau \leq t_m = T. \end{cases} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Соотношение (4.1) при помощи введенных функций (4.3) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{m-1} (-1)^{m+1-i} X_m[T, t_{m-1}] F_{m-1}^{-1} W_i E_i^{-1} \times \\
 & \times \int_{t_0}^T \bar{H}_i[t_i, \tau] u^{(i)}(\tau) d\tau + \int_{t_0}^T \bar{H}_m[T, \tau] u^{(m)}(\tau) d\tau = \eta
 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
 & \int_{t_0}^T \left(\sum_{i=1}^{m-1} (-1)^{m+1-i} X_m[T, t_{m-1}] F_{m-1}^{-1} W_i E_i^{-1} \times \right. \\
 & \left. \times \bar{H}_i[t_i, \tau] u^{(i)}(\tau) \right) d\tau + \int_{t_0}^T \bar{H}_m[T, \tau] u^{(m)}(\tau) d\tau = \eta. \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

Введем обозначения:

$$H[\tau] = (H_1[\tau], \dots, H_{m-1}[\tau], H_m[\tau]),$$

$$u(\tau) = (u^{(1)}(\tau), \dots, u^{(m-1)}(\tau), u^{(m)}(\tau))^T, \quad (4.5)$$

где

$$\begin{aligned}
 H_i[\tau] &= (-1)^{m+1-i} X_m[T, t_{m-1}] F_{m-1}^{-1} W_i E_i^{-1} \bar{H}_i[t_i, \tau], \\
 & i = 1, \dots, m-1; \quad H_m[\tau] = \bar{H}_m[T, \tau].
 \end{aligned}$$

Учитывая обозначения (4.5), соотношение (4.4) запишем в виде

$$\int_{t_0}^T H[\tau] u(\tau) d\tau = \eta. \quad (4.6)$$

Для любой задачи управления принципиален вопрос о ее разрешимости, который сводится к анализу управляемости системы. Из формулы (4.6) следует, что составная система (1.1) вполне управляема тогда и только тогда, когда для любого вектора η (4.2) из R^{n_m} можно найти управление $u(\tau, \eta) = (u^{(1)}(\tau, \eta), \dots, u^{(m)}(\tau, \eta))^T$, удовлетворяющее условию (4.6).

Таким образом, условие вполне управляемости составной системы (1.1) можно сформулировать в виде следующей теоремы.

Теорема 2. Для того чтобы составная система (1.1) была вполне управляемой на отрезке $[t_0, T]$, необходимо и достаточно, чтобы вектор-столбцы матрицы

$$\begin{aligned}
 & H[\tau] = ((-1)^m X_m[T, t_{m-1}] F_{m-1}^{-1} W_1 F_1^{-1} \bar{H}_1[t_1, \tau], \dots, \\
 & X_m[T, t_{m-1}] F_{m-1}^{-1} W_{m-1} E_{m-1}^{-1} \bar{H}_{m-1}[t_{m-1}, \tau], \bar{H}_m[T, \tau])
 \end{aligned}$$

были линейно независимыми на этом отрезке. ♦

Теперь, на основе изложенного, функцию $u(t)$, удовлетворяющую интегральному соотношению (4.6), ищем в виде [11]

$$u(t) = H^T[t] C + V(t), \quad (4.7)$$



где C — постоянный вектор, подлежащий определению, $V(t)$ — некоторая вектор-функция (может быть, измеримая ограниченная функция на промежутке времени $[t_0, T]$) такая, что

$$\int_{t_0}^T H[t]V(t)dt = 0. \quad (4.8)$$

Равенство (4.8) выражает условие ортогональности вектор-функций $V(t)$ ко всем строкам (блокам) матрицы $H[t]$.

Подставляя выражение (4.7) в условие (4.6) и учитывая условия (4.8), получим

$$Q(t_0, \dots, T)C = \eta(t_0, \dots, T), \quad (4.9)$$

где

$$Q(t_0, \dots, T) = \int_{t_0}^T H[t]H^T[t]dt. \quad (4.10)$$

Уравнение (4.9) является системой $\sum_{k=1}^{m+1} i_k$ алгебраических уравнений относительно неизвестных

$$C_j, j = 1, \dots, \sum_{k=1}^{m+1} i_k.$$

Уравнение (4.9) имеет решение, если $\det Q \neq 0$ либо ранг матрицы Q совпадает с рангом расширенной матрицы $\{Q, \eta\}$.

Решение уравнения (4.9)

$$C = Q^{-1}\eta, \quad (4.11)$$

следовательно, из выражений (4.7) и (4.11) имеем

$$u(t) = H^T[t]Q^{-1}\eta + V(t). \quad (4.12)$$

Таким образом, решение задачи 1 можно сформулировать в виде следующей теоремы, аналогичной теореме, доказанной в работе [11].

Теорема 3. Для того чтобы существовало программное управление (4.7) (или (4.12)) и соответствующее ему решение системы (1.1), удовлетворяющее условиям (1.2)—(1.4), необходимо и достаточно, чтобы матрица (4.10) была неособой или чтобы ранги матриц Q и $\{Q, \eta\}$ были одинаковы. ♦

Для решения задачи 2 заметим следующее. При заданном критерии качества $\mathcal{E}[u]$ задачу оптимального управления с интегральными условиями (4.6) можно рассматривать как задачу условного экстремума из вариационного исчисления, где надлежит определить минимум функционала $\mathcal{E}[u]$ при условиях (4.6). Однако, как видно из формул (4.3) и (4.5), подинтегральные функции в условии (4.6) являются разрывными, поэтому классические теоремы вариационного исчисления не применимы для исследования этой задачи.

Левая часть условия (4.6) является линейной операцией, порожденной функцией $u(t)$ на промежутке времени $[t_0, T]$ [6].

Следовательно, если функционал $\mathcal{E}[u]$ является нормой некоторого линейного нормированного пространства, то решение задачи 2 следует искать путем решения проблемы моментов, тогда набор оптимальных управляющих воздействий $u^0(t)$, $t \in [t_0, T]$, минимизирующий функционал $\mathcal{E}[u]$ и удовлетворяющий условию (4.6), будет решением задачи 2. Таким образом, задача 2 приводится к проблеме моментов, решение которой известно из работы [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен конструктивный подход к исследованию задач управления линейными составными системами. Учитывая линейность условия преемственности между составными системами, введена формула определения фазового состояния составной системы (1.1) для произвольного момента времени t из любого промежутка времени $[t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, m$, при заданном начальном состоянии. Используя явный вид управляемого движения составной системы, исследованы некоторые характерные свойства движения. Построено решение задачи управления линейными составными системами и предложен способ решения задачи оптимального управления, сформулированы условия существования программного управления и движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Величенко В.В. Оптимальное управление составными системами // Докл. АН СССР. — 1967. — Т. 176, № 4. — С. 754—756.
2. Ащепков Л.Т. Оптимальное управление системой с промежуточными условиями // Прикладная математика и механика. — 1981. — Т. 45, вып. 2. — С. 215—222.
3. Куржанский А.Б. Задачи динамики и управления для гибридных систем // Тез. докл. междунар. конгресса «Нелинейный динамический анализ — 2007», 4—8 июня 2007 г. — СПб., 2007. — С. 10.
4. Borrelli F., Baotic M., Bemporad A., Morrieri M. Dynamic programming for constrained optimal control of discrete-time linear hybrid systems // Automatica. — 2005. — Vol. 41. — P. 1709—1721.
5. Johansson M. Piecewise Linear Control Systems. — Berlin: Springer, 2003. — 202 p.
6. Красовский Н.Н. Теория управления движением. — М.: Наука, 1968. — 476 с.
7. Сансоне Дж. Обыкновенные дифференциальные уравнения. — М.: Иностран. лит., 1954. — Т. 2.
8. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. — М.: Наука, 1972. — 576 с.
9. Черноусько Ф.Л. Оценка фазового состояния динамических систем. — М.: Наука, 1988. — 320 с.
10. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функционального анализа. — М.: Наука, 1976. — 496 с.
11. Зубов В.И. Лекции по теории управления. — М.: Наука, 1975. — 496 с.

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

Барсегян Ваня Рафаелович — д-р физ.-мат. наук, профессор, Ереванский государственный университет, ☎ (374-10) 52-36-40, ✉ barseghyan@sci.am, barsegh@ysu.am.

МЕХАНИЗМЫ ПРИНЯТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЯНОГО ПОПУТНОГО ГАЗА¹

С.Н. Васильев, Ф.Т. Алескеров, А.А. Иванов, В.И. Якуба

Дан анализ проблем утилизации нефтяного попутного газа. Предложен метод оптимального распределения затрат на прокладку трубопровода, предусматривающий финансирование нефтяными компаниями и возможное участие государства. Построена многокритериальная модель выбора оптимальных альтернатив утилизации нефтяного попутного газа. Создан программный комплекс, реализующий разработанные алгоритмы.

Ключевые слова: утилизация нефтяного попутного газа, трубопровод, многокритериальный выбор, экономический механизм, сценарный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации попутного газа на нефтяных месторождениях в России актуальна. Если в Норвегии попутный газ утилизируется полностью, то в нашей стране, даже на самых технологически развитых нефтяных месторождениях, степень утилизации попутного газа не превышает 40 %, а зачастую равна нулю.

Несмотря на ряд мер законодательного характера, принятых государством и регионами и призванных повысить степень утилизации попутного газа, активных шагов со стороны нефтедобывающих предприятий в этом направлении не предпринимается. Это связано с региональными особенностями добычи и, прежде всего, с удаленностью скважин от соответствующей инфраструктуры.

Объемы добычи и сжигания нефтяного попутного газа (НПГ) в России довольно трудно оценить.

По данным Министерства природных ресурсов и экологии РФ, из 55 млрд. м³ ежегодно добываемого в России НПГ лишь 26 % (14 млрд. м³) направляется в переработку, 47 % (26 млрд. м³) идет на нужды промыслов либо списывается на технологические потери и 27 % (15 млрд. м³) сжигается

в факелах [1]. По подсчетам Министерства, из-за недостаточной степени переработки НПГ бюджет ежегодно теряет около 13 млрд. долл. Имеются в виду не прямые потери, исчисленные исходя из стоимости самого НПГ, а потери, связанные с недополучением более дорогостоящей продукции на предприятиях нефтехимической промышленности, в том числе продукции, которая могла бы быть экспортирована в другие страны.

Основной объем сжигания нефтяного газа приходится на Западную Сибирь, где добывается более 80 % российской нефти. Уровень утилизации газа здесь ниже, чем в других районах страны в силу более слабой инфраструктурной освоенности и большей удаленности месторождений от газоперерабатывающих заводов (ГПЗ).

1. АНАЛИЗ ПРИЧИН СЖИГАНИЯ НЕФТЯНОГО ПОПУТНОГО ГАЗА

Причины сжигания НПГ в России определяются тем, что исторически развитие добывающей и перерабатывающей отраслей не было скоординировано.

Можно выделить следующие причины сжигания НПГ в России [2, 3].

- Технические причины:
— отсутствие необходимой производственной и технологической инфраструктуры;

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке программ № 14 и № 23 Президиума РАН.



- несовершенство методики и техники измерения, учета и оценки ресурсов НПГ;
 - системы сбора и утилизации НПГ ориентированы на централизованные схемы поставки.
 - Экономические причины:
 - неадекватное налогообложение газовой отрасли в сопоставлении с условиями добычи «нового» природного газа и НПГ (в целом система налогообложения в газовом секторе экономики страны не учитывает качественные различия характеристик добываемых углеводородов и не принимает во внимание различные горно-геологические условия их добычи);
 - повышенная капиталоемкость процессов сбора и направления на утилизацию НПГ по сравнению с природным газом.
 - Организационно-институциональные причины:
 - отсутствие заинтересованности ряда нефтяных компаний в ведении бизнеса, связанного со сбором, утилизацией и использованием НПГ;
 - отсутствие гарантий доступа сухого отбензиненного газа к газотранспортной системе;
 - неэффективность существующей в России системы государственного контроля и мониторинга за ходом выполнения лицензионных соглашений (достижение определенных уровней утилизации НПГ);
 - конкуренция между различными государственными структурами.
- Кроме того, себестоимость НПГ выше, чем природного газа, так как:
- значительно меньше дебиты нефтяных скважин по газу по сравнению с дебитами газовых скважин;
 - меньше давление НПГ;
 - присутствуют значительные объемы жидких углеводородов, что требует повышенных энергетических и материальных затрат на сбор, переработку и компрессирование НПГ для подачи потребителям в систему магистральных газопроводов;
 - необходимо сооружение более разветвленной системы газосборных промысловых трубопроводов.
- Существуют следующие потери и угрозы для государства в связи со сжиганием НПГ:
- экономические: доход от нефтепродуктов выше в 1,5 раза, а от нефтехимической продукции в 5—10 раз, чем от сырой нефти; НПГ содержит наиболее высокую долю ценных сырьевых компонентов (этан, пропан, бутан, пентан), чем другие газы извлекаемые из недр;
 - экологические: загрязнение окружающей среды, основным источником которого является сжигание НПГ. По Киотскому протоколу это может вылиться в прямые финансовые потери.

2. АНАЛИЗ ПОЗИЦИЙ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН — ГОСУДАРСТВА И НЕФТЯНЫХ КОМПАНИЙ [4]

На федеральном и региональном уровне отсутствует понимание, что для решения проблем утилизации, а именно, эффективного использования НПГ со стороны государства необходим комплексный подход, включающий в себя:

- определение критериев эффективности использования НПГ и места ресурсов НПГ в системе газоснабжения страны;
- разработку процедур принятия решений по выбору вариантов утилизации НПГ (или разрешения на его сжигание) в зависимости от конкурентных экономических и иных условий;
- применение механизмов лицензирования на право пользования недрами для реализации выбранных вариантов утилизации НПГ и мониторинга данного процесса;
- применение мер экономического стимулирования и принуждения;
- сбалансированную ценовую политику;
- создание недискриминационных условий для поставок НПГ и продуктов его переработки на рынок.

Особо важно отметить, что проблему утилизации НПГ невозможно решить, опираясь только на методы принуждения, штрафов и санкций.

Нефтяным компаниям невыгодно утилизировать НПГ, так как для этого требуются вложения капитала в строительство систем сбора НПГ, газопроводов и др. Нефтяным компаниям было бы выгодно, если часть расходов взяли бы на себя государство и нефтехимические компании, но на практике это маловероятно.

Немалые надежды возлагаются на изменение порядка ценообразования на НПГ и сжиженные газы, но рынок НПГ является рынком монопольного покупателя — «Сибур», поэтому неочевидно, что «Сибур» согласится покупать газ по ценам, устраивающим нефтяников. Но даже, если нефтяные компании будут развивать собственные ГПЗ или найдут взаимоприемлемые условия работы с «Сибуром», у нефтяников нерешенной остается проблема с доступом сухого отбензиненного газа в газотранспортную систему «Газпрома».

Поэтому потенциально эффективные планы и проекты нефтяных компаний по утилизации НПГ и развитию газопереработки может обрести реальные черты только при сочетании определенных условий:

- повышение цен на НПГ до экономически обоснованного уровня;
- обеспечение беспрепятственного доступа продукции (в частности, сухого отбензиненного газа) на рынок;

— применение мер стимулирования инвестиционных проектов по утилизации НПГ.

Можно показать, что только при выработке электроэнергии максимальные убытки при утилизации выше, чем при сжигании. В остальных случаях предприятию выгодно утилизировать, нежели сжигать нефтяной попутный газ.

Отметим, что с 1 января 2012 г. началось повышение платы за сверхлимитное (более 5 %) сжигание НПГ.

3. МОДЕЛЬ ПЛАТЕЖЕЙ ЗА ОБЪЕКТЫ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ (ТРУБОПРОВОДЫ)

Таким образом, серьезная проблема в утилизации НПГ состоит в том, что на собственные нужды промысла используется только часть НПГ, другая же часть должна перекачиваться на ГПЗ. В регионах с хорошо развитой инфраструктурой решение этой проблемы не столь затратное; в малоосвоенных же регионах стоимость трубопровода может составить 1,3—1,5 млн долл. за 1 км [4].

Будем моделировать задачу распределения затрат следующим образом. Пусть (N, M, C, T) — четырехместный кортеж, где N — множество участников (владельцев месторождений), $M = (t_1, t_2, \dots, t_m)$, m — натуральное число, обозначает число секций трубопровода, связывающего месторождения с ГПЗ; $C: M \rightarrow R_+$ — функция затрат, которая описывает затраты на строительство каждой секции трубопровода; $T: N \rightarrow 2^M$ — отображение, показывающее секции трубы, используемые каждым участником. Считается, естественно, что множество секций, используемых каждым участником, связано, т. е. $\forall i \in N$ существуют $a_i, b_i \in M$, $a_i \leq b_i$ и $T(i) = \{t \in M \mid a_i \leq t \leq b_i\}$ и $\bigcup_{i \in N} T(i) = M$.

За основу модели можно взять игровые модели оценки платежей [5—8].

Пример 1. Пусть владельцы месторождений 1—4 будут строить трубопровод к ГПЗ так, как показано на рис. 1. Тогда $T(1) = \{t_2, t_3, t_6\}$, $T(2) = \{t_1, t_2, t_3, t_6\}$, $T(3) = \{t_5, t_6\}$, $T(4) = \{t_3, t_4, t_6\}$. ♦

Напомним некоторые определения игр с трансферабельной полезностью — (N, c) , где N — множество участников, $c: 2^N \rightarrow R$ — характеристическая функция игры, $c(\emptyset) = 0$.

Дележ $x \in R^n$, где $x_i \in R$, обозначает платеж участника i . Если S — коалиция участников из N , то

$$x(S) = \sum_{i \in S} x_i$$

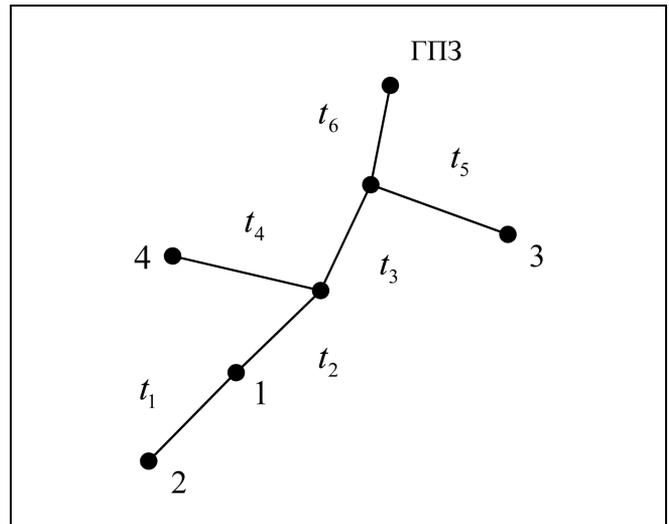


Рис. 1. Схема трубопровода от месторождений к газоперерабатывающему заводу

Дележ x называется эффективным, если $x(N) = c(N)$ и индивидуально рациональным, если $x_i \leq c(\{i\})$ для любого i .

Кортеж (N, M, C, T) будем называть описанием трубопровода.

Свяжем описание трубопровода с игрой (N, c) следующим образом. Если S — коалиция из N , то

$$T(S) = \bigcup_{i \in S} T(i),$$

т. е. это множество секций трубы, используемых коалицией S . Кроме того, определим

$$c(S) = \sum_{t \in T(S)} C(t),$$

где $c(S)$ — затраты коалиции S .

Далее обсудим три возможных решения по распределению затрат в этой модели. Обозначим через $\xi_i(N, M, C, T)$ — размер затрат, которые должен понести участник i .

Первое решение — это распределение стоимости строительства каждой секции $C(t)$ трубопровода равным образом между всеми, кто ею пользуется. Иначе говоря,

$$\xi_i^{eq}(N, M, C, T) = \sum_{t \in T(i)} \frac{C(t)}{\text{card}(\{j \in N \mid t \in T(j)\})},$$

где card — число элементов множества, в данном случае, соответствий участника секции трубопровода.

Можно показать, что решение ξ^{eq} совпадает с ценой Шепли для соответствующей кооперативной игры [9].



Другое естественное решение — это распределить общие затраты пропорционально индивидуальным затратам, т. е.

$$\xi_i^{prop}(N, M, C, T) = \frac{c(\{i\})}{\sum_{j \in N} c(\{j\})},$$

где $C(\{j\})$ — затраты участника j .

Можно показать, что решение ξ_i^{prop} является компромиссно приемлемым решением [8].

Рассмотрим на примерах два случая: полного долевого финансирования строительства трубопровода для НПП участниками; частичного финансирования затрат со стороны государства.

Пример 2. Полное доленое финансирование. Пусть затраты на строительство секций трубопровода таковы, как это показано в табл. 1. Рассчитаем величины ξ_i^{eq} и ξ_i^{prop} для всех i .

Итак,

$$\xi_1^{eq} = \frac{c(t_2)}{\text{card}(\{1, 2\})} + \frac{c(t_3)}{\text{card}(\{1, 2, 4\})} + \frac{c(t_6)}{\text{card}(\{1, 2, 3, 4\})} = \frac{2}{2} + \frac{4}{3} + \frac{3}{4} = 3\frac{7}{12} = 3,58,$$

$$\xi_2^{eq} = \frac{c(t_1)}{1} + \frac{c(t_2)}{2} + \frac{c(t_3)}{3} + \frac{c(t_6)}{4} = \frac{3}{1} + \frac{2}{2} + \frac{4}{3} + \frac{3}{4} = 5\frac{7}{12} = 5,58,$$

$$\xi_3^{eq} = \frac{1}{1} + \frac{3}{4} = 1\frac{3}{4} = 1,75,$$

$$\xi_4^{eq} = \frac{4}{3} + \frac{2}{1} + \frac{3}{4} = 3\frac{7}{12} = 3,58.$$

Для расчета ξ_i^{prop} заметим, что $C(N) = 15$. Тогда, $c(\{1\}) = C(t_2) + C(t_3) + C(t_6) = 9$, $c(\{2\}) = C(t_1) + C(t_2) + C(t_3) + C(t_6) = 12$, $c(\{3\}) = 4$; $c(\{4\}) = 9$.

Теперь,

$$\xi_1^{eq} = \frac{c(1)}{4} c(N) = \frac{9}{34} 15 = 3,97; \quad \xi_2^{eq} = \frac{12}{34} 15 = 5,29,$$

$$\sum_{j=1} c(j)$$

$$\xi_3^{eq} = \frac{4}{34} 15 = 1,77, \quad \xi_4^{eq} = \frac{9}{34} 15 = 3,97.$$

В рамках сформулированного подхода, каждый из участников будет согласен платить не более рассчитанных значений затрат, при условии, что он обязан участ-

вовать в строительстве. Как видим, участники 1, 4 и 2 вынуждены нести затраты по строительству дорогой секции 3 трубопровода, кроме того, участник 2 полностью оплачивает строительство секции 1, которой пользуется только он. ♦

Указанная схема распределения затрат может быть обобщена на случай, когда с разных месторождений поступает газ разного качества, например, газ с более и менее высоким содержанием тяжелых углеводородов.

Рассмотрим обобщение модели пропорционального дележа на случай, когда каждый участник не полностью использует общий ресурс. А именно, будем дополнительно предполагать, что задан коэффициент использования секции трубопровода — функция $u: N \times M \rightarrow R_+$, так что u_{ij} означает долю пропускной способности секции t_j , используемой участником i . Обозначим через ξ_{ij}^{prop} часть стоимости секции t_j , которая должна возмещаться участником i .

Если секция используется участниками не полностью, формально можно построить пропорциональный дележ, который будет удовлетворять соотношению

$$\xi_{ij}^{prop} = \frac{u_{ij}}{\sum_i u_{ij}} c_j,$$

где c_j — стоимость j -й секции.

Однако обратим внимание, что участники не захотят оплачивать эту стоимость, особенно если значение $\xi_{ij}^{prop} - u_{ij} \xi_{ij}^{prop}$ очень велико.

Пример 3. Софинансирование со стороны государства. Пусть стоимость j -й секции равна 4, ею пользуются два участника, 1 и 2, и коэффициент использования равен 0,3 и 0,5 соответственно. Если «разложить» эту стоимость на обоих участников пропорционально использованию, то участник 1 должен будет заплатить

$$\frac{0,3}{0,3 + 0,5} 4 = 1,5, \text{ а участник 2 — } \frac{0,5}{0,3 + 0,5} 4 = 2,5.$$

Так, в нашем примере $\xi_{1j}^{prop} - u_{1j} c_j = 1,5 - 1,2 = 0,3$, $\xi_{2j}^{prop} - u_{2j} c_j = 2,5 - 2 = 0,5$, т. е. превышение для каждого составит не менее 20 %.

В этой ситуации предлагается ввести еще одного участника — федеральный центр и/или регион, который возьмет на себя финансирование разницы между стоимостью проекта и затратами участников. Для координации целей по утилизации НПП в конкретных регионах предлагается создать ОАО «Утилизация НПП — регион», в котором часть акций должна принадлежать государству/региону. Особенно это касается тех регионов, в которых объекты общего пользования, такие как ГПЗ или газопровод, будут загружены не сразу, а по мере освоения месторождений. Соответственно, финансирование

Таблица 1

Затраты на строительство секций трубопровода

Секция	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
Затраты	3	2	4	2	1	3

таких проектов должно поддерживаться государством, и прибыль должна делиться пропорционально вложениям. Кроме того, имеет смысл размещение акций на бирже в целях привлечения средств граждан под гарантии государства.

Этому участнику (обозначим его номером 0) приписывается разность между 1 и суммой коэффициентов использования секции, т. е.

$$u_{0j} = 1 - \sum_i u_{ij}$$

Тогда, пропорциональный дележ стоимости с учетом коэффициента использования секции j будет выглядеть так:

$$\xi_{ij}^{prop} = \frac{u_{ij}}{\sum_{i=0} u_{ij}} c_j$$

а всего участник i должен будет выплатить величину

$$\xi_i^{prop} = \sum_j \xi_{ij}^{prop}$$

Рассмотрим пример, приведенный в табл. 2. В левом столбце этой таблицы показаны значения стоимости

Таблица 2

Стоимость секций трубопровода и значения коэффициентов их использования

Стоимость	Секция	Участники				
		1	2	3	4	ОАО
3	t_1	0	0,8	0	0	0,2
2	t_2	0,4	0,1	0	0	0,5
4	t_3	0,4	0,1	0	0,2	0,3
2	t_4	0	0	0	0,9	0,1
1	t_5	0	0	0,9	0	0,1
3	t_6	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1

Таблица 3

Значения дележа стоимости секций трубопровода между участниками

Секция	Участники				
	1	2	3	4	ОАО
t_1	0	2,4	0	0	0,6
t_2	0,8	0,2	0	0	1
t_3	1,6	0,4	0	0,8	1,2
t_4	0	0	0	1,8	0,2
t_5	0	0	0	0,9	0,1
t_6	0,9	0,9	0,6	0,3	0,3
Итого	3,3	3,9	0,6	3,8	3,4

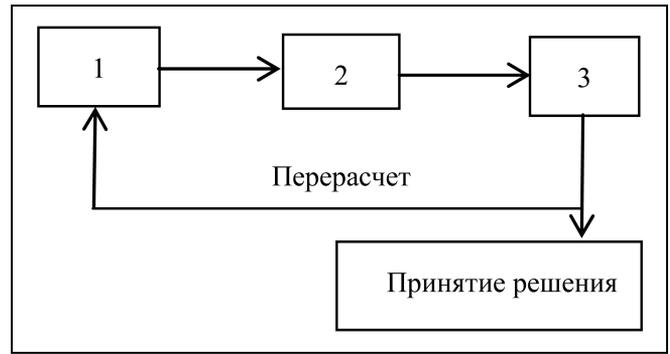


Рис. 2. Двухступенчатая модель принятия решений

секций $t_1 - t_6$. В столбцах 3—6 приведены значения коэффициентов использования соответствующих секций участниками 1—4. В последнем столбце табл. 2 показаны значения коэффициентов использования для ОАО.

В табл. 3 приведены значения дележа стоимости секций между участниками. Так, по первой секции, стоимость которой равна 3, участник 2 оплачивает 2,4, а ОАО — 0,6.

Указанная модель может использоваться для финансирования строительства любых объектов общего пользования, необходимых для утилизации НПГ. ♦

4. МОДЕЛЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЯНОГО ПОПУТНОГО ГАЗА

Предлагается следующая модель:

- 1) решение оптимальной задачи о распределении ресурсов между различными способами утилизации НПГ для отдельных компаний;
- 2) решение задачи о распределении платежей при строительстве объектов общего пользования для переработки НПГ, например, трубопроводов;
- 3) перерасчет параметров.

Сама схема принятия решений приведена на рис. 2.

Аналогичная двухступенчатая модель принятия решений исследовалась в работе [10]. Расширение такого рода моделей может учитывать и ограничения на экологическую нагрузку территорий, и тогда модифицировать платежи можно согласно схемам, предложенным в работе [11].

Различные варианты утилизации природного газа в месте добычи, различные варианты прокладки трубопровода, различная стоимость отдельных «звеньев» трубопровода определяют различные варианты утилизации НПГ. Эти варианты предлагается оценивать по многим критериям.

Структура модели многокритериального выбора представлена на рис. 3.

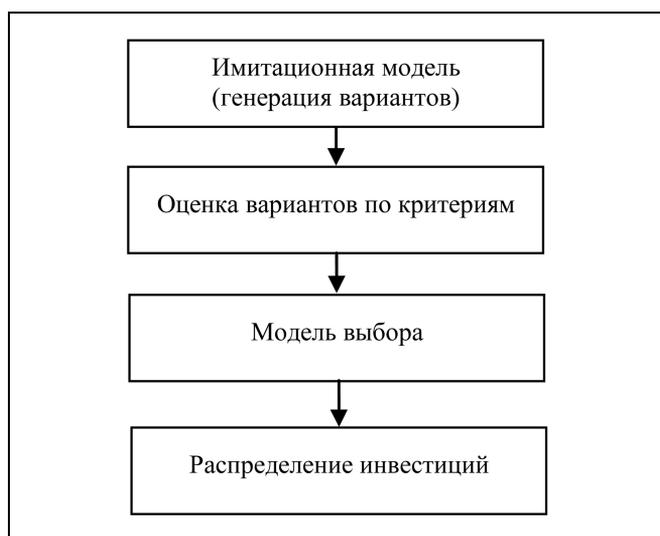


Рис. 3. Структура модели многокритериального выбора

Использование такой общей модели позволяет учесть не только стоимость утилизации НПП, но и важнейшие экологические характеристики территории.

5. МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Указанные выше варианты утилизации НПП от группы скважин предлагается оценивать по следующим критериям:

1) экологическая эффективность — остаточное количество сжигаемого газа после проведения трубопровода;

2) стоимость;

3) размер нарушения природного баланса при прокладке трубопровода, который оценивается по объему воздействия на природную среду, а именно, на почвенно-растительный покров, водный бассейн. Если трубопровод прокладывается вдоль существующих трубопроводных систем, то в соответствующих местах размер воздействия принимается равным нулю. Измеряется в квадратных километрах территории, которая подвергается воздействию.

Все критерии 1—3, очевидно, минимизируются.

В качестве модели выбора предлагается принять пороговую модель агрегирования, разработанную в Институте проблем управления РАН [12—14]. Для этого все данные сначала переводятся в ранговую форму. А именно, строятся значения показателей для каждого варианта, и экспертно определяется степень выраженности показателя в трехградационной шкале. Например, для показателя стоимости степень выраженности по-

казателя может иметь вид: низкая, средняя и высокая стоимость. Возможно представление данных с более высокой точностью, например, в шкале из m рангов.

Переход к ранговой шкале позволяет сделать модели более устойчивыми к малым искажениям исходной информации, которые неизбежно возникают вследствие ее неполноты.

При переходе к ранговой модели будем предполагать, что большие ранговые оценки соответствуют меньшему значению показателя. Это связано с тем, что, согласно устоявшейся традиции, критерии обычно максимизируются.

Для агрегирования применяется следующая пороговая модель (случай трехградационных ранжировок).

Пусть $v_1(x)$ — число участников, для которых альтернатива x является наилучшей в их предпочтениях, т. е. имеет ранг 1, $v_2(x)$ — число участников, для которых альтернатива x является второй наилучшей, т. е. имеет ранг 2. Затем альтернативы упорядочиваются лексикографически. Говорят, что альтернатива x доминирует альтернативу y если $v_1(x) < v_1(y)$ или, если $v_1(x) = v_1(y)$, но $v_2(x) < v_2(y)$. Другими словами, в первую очередь сравниваются количества последних мест в упорядочениях для каждой альтернативы, в случае, когда они равны, идет сравнение количества вторых мест. Выбором служат альтернативы, недоминируемые по V .

Иная модель агрегирования, которая может использоваться в поставленной задаче, приведена в работе [15].

6. ИМИТАЦИЯ И СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧЕ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДА

В качестве модели для решения задачи была выбрана модель в виде дерева (графа без циклов), при этом предполагалось, что существует единственный путь от источника добычи до конечной точки.

В рассматриваемой модели каждая скважина, каждая промежуточная точка и конечный пункт назначения представлены в виде вершин графа. В роли ребер выступают либо секции трубопровода, либо насосные станции, которые характеризуются своей стоимостью.

Объем НПП, транспортируемый от конкретной скважины, рассчитывается как разность между объемом добычи и объемом переработки НПП на месте для данной скважины.

Таким образом, ставится задача нахождения путей от каждой скважины до пункта назначения, при условии, что такой пункт единственный. В ре-

шении данной задачи применялся метод обхода графа (поиск) в ширину. С его помощью находился путь от каждой вершины-скважины к вершине-стоку. После этого для каждого участка трубопровода была вычислена его загруженность, т. е. подсчитано суммарное количество проходящих через него за единицу времени нефтепродуктов.

Следующим шагом стал подсчет для каждого маршрута от скважины к вершине-стоку его стоимости. Для этого использовались данные, полученные на предыдущем шаге, о загруженности каждого участка трубопровода. Суммировались по каждому участку доли скважины в общем потоке по участку трубы (частное от деления потока нефтепродуктов текущего источника на общий поток нефтепродуктов через данный участок трубопровода), умноженные на стоимость участка трубы, которая приходится на владельцев скважин (общая стоимость участка трубы минус стоимость, которая платится ОАО «Утилизация НПП — регион»).

7. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Описание программного комплекса. Предложенные модели реализованы в виде программного комплекса, представляющего собой расчетный модуль со средствами интерактивной работы пользователя. Комплекс разработан с помощью средств VS2010 на языке C#.

Описание процедуры тестирования. Случайным образом генерируется граф-дерево с 1000 листьями. Глубина каждого листа (число ветвей до достижения магистрали) изменялась от 2 до 5. Стоимость каждой ветви (ребра графа-дерева) — случайное число от 0,7 до 1,2 (соответствует равномерному распределению). Магистраль, к которой выводятся (подключаются) ветви, считается построенной, расходы на нее не учитываются.

Выбрано пять компаний-владельцев скважин. Емкость каждой скважины — целое случайное число от 1 до 10. Стоимость одной ветви распределяется между собственниками источников пропорционально прокачиваемому количеству вещества (НПП).

Алгоритм генерации графа. Требуется случайно сгенерировать дерево на 1000 вершин. Известно, что в дереве должна быть так называемая «главная магистраль». Если удалить ее из графа, то он распадется на несколько несвязанных между собой компонентов. При решении предполагается, что такая магистраль уже построена. Таким образом, требуется лишь сгенерировать некоторое число

графов (которые, очевидно, являются корневыми деревьями) так, чтобы суммарное число листьев на всех этих поддеревьях было равно 1000.

Предположим, что число таких поддеревьев (малых корневых деревьев) ровно 200. Тогда остается распределить 1000 скважин по этим поддеревьям (компонентам). Для каждой скважины генерировался ее ресурс (количество НПП, которое можно из нее извлечь, от 1 до 10), владелец (1 из 5), глубина (число ветвей до магистрали) и принадлежность к одному из 200 компонентов графа.

Алгоритм решения задачи. После генерации 1000 вершин, соответствующих скважинам, каждая из которых принадлежит одному из поддеревьев, обрабатывается каждое из этих поддеревьев. На основе информации о глубине каждой вершины каждого поддерева восстанавливается структура корневого дерева. Для него рассчитывается стоимость прокачки для каждой из вершин (скважин) на основе долевого (по прокачиваемому объему) вклада. Стоимость каждой ветви — сгенерированное случайное число от 0,7 до 1,2. Для каждой ветви подсчитывается, из скольких скважин будет проводиться прокачка через эту ветвь. Доля затрат владельца скважины равна

$$\frac{\text{емкость источника}}{\text{общее количество качаемого через трубу НПП}} \times \text{стоимость трубы.}$$

С помощью поиска в ширину определяется, из каких источников по каким секциям трубопровода будет прокачиваться НПП. Поиск в ширину по графу запускается по очереди, стартуя из каждого источника. В результате строится путь прокачки. Далее отмечаются ребра графа (ветви), через которые этот путь (из очередного источника) проходит. После работы такого алгоритма для каждого источника для каждой ветви получается список источников, которые будут использовать для прокачки данную ветвь. Затем рассчитываются доли вложений для владельца каждой скважины, исходя из приведенной формулы.

Для каждого владельца скважин рассчитываются его суммарные вложения как сумма вкладов для всех его скважин.

Результат работы программы: число скважин 1000, число ветвей 1704, общая стоимость 1612,19 (табл. 4).

Как видим, предложенный подход допускает сценарный анализ возможных реализаций проекта строительства трубопровода для утилизации НПП. Возможен расчет различных вариантов затрат для нефтедобывающих предприятий при определен-



Таблица 4

Расчет затрат участников строительства трубопровода

Участник	Число скважин	Распределение вложений при разных долях государства		
		доля государства, %		
		5	10	15
1	173	245,6	232,7	219,8
2	203	304,9	288,8	272,8
3	193	298,6	282,9	267,2
4	235	374,7	355,0	335,3
5	196	307,7	291,5	275,3
Государство	—	80,6	161,2	241,8

ных параметрах бюджета, или, с другой стороны, расчет требуемых затрат бюджета при заданной доле участия государства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель позволяет оценить эффект утилизации НПП в статике, т. е. в том случае, когда не учитывается изменение дебита НПП по скважинам. Изменения дебита можно моделировать, используя средние значения за T лет.

В настоящее время построен программный комплекс, в котором применен линейный алгоритм с алгоритмической сложностью $O(N)$, где N — число скважин.

Программный комплекс позволяет выбирать наиболее эффективную схему утилизации НПП, оценивать эффективный маршрут транспортировки НПП с месторождения с учетом потребности других производителей, использовать аукционные процедуры типа Викри [16] для определения наиболее эффективной схемы инвестиций в прокладку трубопровода для утилизации НПП, строить модели справедливого распределения прибыли, возникающей в результате утилизации НПП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Книжников А.Ю., Пусенкова Н.Н. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России / Проект «Экология и Энергетика. Международный контекст». — М., 2009. — ИМЭМО РАН. — Вып.1.
2. Андреева Н.Н. Пути повышения уровня использования попутного нефтяного газа / Центральная комиссия по разработке полезных ископаемых. Заседание 20.10.2005. — URL: www.oil-info.ru/lit/CKR/Doklad.pdf (дата обращения 27.01.2012).
3. Крюков В.А., Силкин В.Ю., Токарев А.Н., Шмат В.В. Как потушить факелы на российских нефтепромыслах: институ-

туциональный анализ условий комплексного использования углеводородов (на примере попутного нефтяного газа). — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2008. — 340 с.

4. Бочаров В. В. Инвестиционный менеджмент. — СПб.: Питер, 2000. — 160 с.
5. Moulin H. Axiomatic Cost and Surplus — Sharing // Handbook of Social Choice and Welfare, Arrow, Sen and Suzumura (eds.), Edition 1. — 2001. — Vol. 1, ch. 6. — P. 289—357.
6. Moulin H, Sprumont Y. On demand responsiveness in additive cost sharing // Journal of Economic Theory. — 2005. — N 125. — P. 7—36.
7. Moulin H, Sprumont Y. Fair allocation of production externalities: Recent results // Revue d'économie politique. — 2005. — N 117. — P. 18—37.
8. Tijs S. Bounds for the core and the τ -value // Game Theory and Mathematical Economics / O. Moeshin, B. Pallashke (eds.). — Amsterdam, 1981. — P. 123—132.
9. Shapley L.S. A value for n -person games // Contributions to Theory of Games II (Annals of Mathematics Studies, 28) / Ed. by H.W. Kuhn and A.W. Tucker. — Princeton, 1953. — P. 307—317.
10. Aleskerov F., Cinar Y. 'q-Pareto-scalar' Two-stage Extremization Model and its Reducibility to One-stage Model // Theory and Decision. — 2008. — Vol. 65, iss. 4. — P. 325—338.
11. Васильев С.Н. Гармонизация интересов сторон при платежах предприятий за загрязнение // Моделирование и управление процессами регионального развития / Под ред. С.Н. Васильева. — М.: Физматлит, 2001. — 432 с.
12. Алескеров Ф.Т., Юзбашев Д.А., Якуба В.И. Пороговое агрегирование трехградационных ранжировок // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 1. — С. 147—152.
13. Алескеров Ф.Т., Якуба В.И. Метод порогового агрегирования трехградационных ранжировок // Докл. академии наук. — 2007. — Т. 413, № 2. — С. 181—183.
14. Aleskerov, F., Chistyakov V., Kaliyagin V. The threshold aggregation // Economic Letters. — 2010. — N 107. — P. 261—262.
15. Алескеров Ф.Т., Субочев А.Н. Об устойчивых решениях в ординальной задаче группового выбора // Докл. академии наук. — 2009. — Т. 426, № 3. — С. 318—320.
16. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders // Journal of Finance. — 1961. — Vol. 16, iss. 1. — P. 8—37.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Васильев Станислав Николаевич — академик РАН, директор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ☎ (495) 334-89-10, ✉ snv@ipu.ru,

Алескеров Фуад Тагиевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ☎ (495) 334-88-69, ✉ alesk@ipu.ru; зав. кафедрой, Национальный исследовательский университет — Высшая школа экономики,

Иванов Александр Александрович — инженер, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ☎ (495) 334-88-69, ✉ gcrp@ipu.ru; стажер-исследователь, Национальный исследовательский университет — Высшая школа экономики,

Якуба Вячеслав Иванович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ☎ (495) 334-88-69, ✉ yakuba@ipu.ru, г. Москва.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПОРТФЕЛЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ ПРОЕКТОВ И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ ПО ВРЕМЕНИ

М.В. Недовесов, З.Г. Руденко

Рассмотрен подход к решению задачи формирования оптимального портфеля взаимозависимых проектов. Предложены алгоритмы формирования оптимального портфеля взаимозависимых по эффекту проектов и его оптимизации по времени, основанные на методах сетевого программирования. Приведен пример решения частного случая указанной задачи.

Ключевые слова: дискретная оптимизация, математическое программирование, управление портфелем проектов, управление проектами.

ВВЕДЕНИЕ

Инвестиционная деятельность предприятий — один из факторов инновационного развития и экономического роста. Увеличение объемов инвестиций и повышение эффективности инвестиционной деятельности обеспечивают экономический рост в долгосрочной перспективе, успешное социально-экономическое развитие общества и повышение эффективности производства.

На практике многие предприятия осуществляют инвестиционную деятельность в форме финансирования проектов. Для эффективного распределения и оптимального планирования ресурсов необходимо учитывать взаимосвязи между проектами. Проекты называются взаимосвязанными, если эффект или затраты одного проекта напрямую зависят от результатов реализации другого.

Среди моделей формирования портфеля проектов выделяют три основных класса: детерминированные модели, модели стохастического программирования и модели принятия решений при наличии элементов неопределенности [1].

В данной работе речь идет о детерминированных моделях, в свою очередь, подразделяющихся на линейные, нелинейные, динамические и модели графических структур. Достаточно широко распространены *линейные модели*. В них целевая функция и ограничения линейны по управляющим переменным. Наиболее известными являются следующие линейные модели [1]: статическая

модель Дина, одноступенчатая модель Альбаха, многоступенчатая модель Хакса и Вайнгартнера, расширенная модель Ферстнера — Хенна и модель с возможностями выбора установок и дезинвестиций Якоба. В *нелинейных моделях* зависимости между постоянными и переменными факторами описываются нелинейными функциями. Для таких моделей нет единого метода решения порождаемых ими задач, и большое распространение получили прямые методы, основанные на итеративных процессах вычисления и сравнения значений оптимизируемых функций (семейство градиентных методов, метод наискорейшего спуска, методы дробления шага, метод Гаусса—Зейделя) [2]. В основу *динамических моделей* положена динамическая оптимизация, основанная на принципе оптимальности и уравнении Беллмана. В качестве достоинств такого рода моделей выделяют: безразличие метода динамического программирования к виду и способу задания целевой функции и ограничений, а также возможность анализа решений на чувствительность к изменению начального состояния моделируемых систем [2]. Кроме того, на практике часто возникает необходимость решения задач, связанных с формированием портфеля, с помощью *графических структур*. Методы их построения и анализа изучаются в рамках теории графов.

Цель данного исследования заключается в разработке подхода к управлению портфелем проектов с учетом различного рода взаимозависимостей между ними. Такой подход сводится к решению ряда задач дискретной оптимизации, которые ха-



рактируются тем, что число допустимых решений экспоненциально растет с ростом размерности задач. Для их решения в данной работе применен метод, основанный на методах дихотомического и сетевого программирования [3, 4].

1. ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА ОБЩИЕ ЗАТРАТЫ

Рассмотрим портфель проектов, эффект от реализации которых зависит от набора финансируемых проектов. Примером такого набора могут служить проект разработки нового товара в рамках существующей линейки продуктов и проект рекламной кампании, направленной на увеличение объемов продаж линейки продуктов. Предполагается, что эффекты от реализации связанных проектов комплементарные, т. е. изменение эффекта от реализации одного проекта ведет к изменению эффекта от реализации другого в том же направлении.

Для описания взаимосвязей между проектами введем $n \times n$ -матрицу взаимозависимости $[d_{ij}]$.

Значение элемента $d_{ij} \geq 0$ показывает дополнительный эффект, который получает проект i от успешной реализации проекта j . Если $d_{ij} = 0$, то реализация проекта i не зависит от успешной реализации проекта j . Диагональные элементы d_{ij} , $i = j$, определяют минимальный эффект, получаемый от реализации i -го проекта (независимо от выполнения остальных проектов). Таким образом, эффект от реализации проекта i равен $\sum_{j \in A} d_{ij}$, где A — множество всех реализованных проектов.

Рассмотрим n проектов, со следующими характеристиками: c_i — затраты, требуемые для выполнения проекта i , P — ограничение на общий эффект, получаемый от реализации выбранных проектов. Задача формирования портфеля проектов может быть представлена в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \xrightarrow{\{x_i, i=\overline{1, n}\}} \min, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \left(\sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \right) \geq P, \quad (2)$$

$$x_i \in \{0; 1\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Построим сетевое представление задачи (1)—(3), т. е. общее представление целевой функции и ограничений в виде определенной суперпозиции более простых функций. Для этого представим ограничения (2) в виде сети следующим образом: в

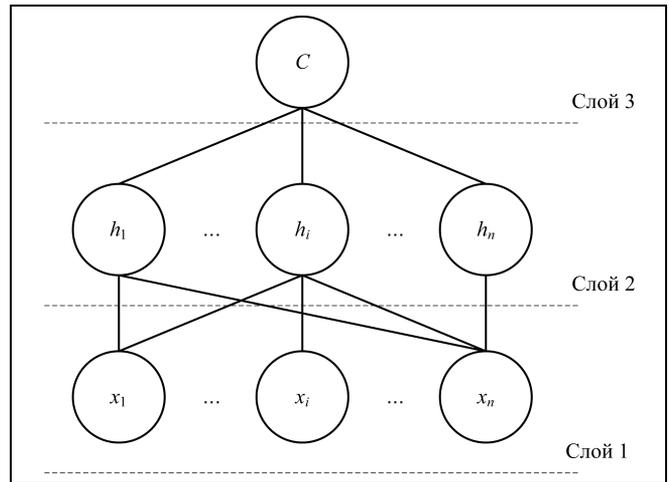


Рис. 1. Сетевое представление задачи (1)—(3)

вершины первого слоя помещаем переменные $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$; в вершины второго слоя — функции $\{h_i\}$:

$$h_i(x) = x_i \left(\sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \right), \quad i = \overline{1, n};$$

на третьем, последнем, слое находится единственная вершина C , соответствующая выходу из сети (рис. 1). Число дуг, входящих в вершину i второго слоя соответствует числу ненулевых элементов матрицы $[d_{ij}]$ в строке i .

Представим каждый коэффициент c_i целевой функции задачи (1)—(3) в виде следующей суммы (разбиения):

$$c_i = \sum_{j=1}^{k_i} z_i^j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где k_i — число ребер, выходящих из вершины x_i первого слоя сетевого представления функции ограничений задачи (1)—(3). Далее будет показано, что для каждого такого разбиения может быть получена нижняя оценка целевой функции (1) при ограничениях (2), (3). Формально разбиение (4) может быть сделано различными способами, поэтому для улучшения нижней оценки функции (1) целесообразно поставить задачу определения такого разбиения коэффициентов c_i на слагаемые, при котором соответствующая нижняя оценка максимальна (двойственная задача).

Для удобства вычислений введем n коэффициентов z_i для каждого c_i , где $(n - k_i)$ коэффициентов равны нулю (вершины h_j второго слоя сетевого представления, у которых отсутствуют входящие ребра из вершины i).

Тогда для каждой вершины h_i второго слоя будет решаться следующая задача оптимизации:

$$\sum_{j=1}^n z_j^i x_j \xrightarrow{\{x_j\}, j=\overline{1, n}} \min, \quad (5)$$

$$h_i(x) = x_i \left(\sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \right) \geq p_i. \quad (6)$$

Так как $x_i \in \{0, 1\}$, то задача (5), (6) сводится к задаче:

$$\sum_{j=1}^n z_j^i x_j \xrightarrow{\{x_j\}, j=\overline{1, n}} \min, \quad (7)$$

$$\tilde{h}_i(x) = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \geq p_i, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^n p_i \leq P$.

Пусть $G_i(z^i, p_i)$ — значение целевой функции задачи (7), (8) в ее оптимальном решении для каждого разбиения (4) коэффициентов c_i на слагаемые $z_i^1, \dots, z_i^{k_i}$. Тогда на последнем (третьем) слое сетевого представления задачи (1)–(3) будет решаться следующая задача:

$$\sum_{i=1}^n G_i(z^i, p_i) \xrightarrow{\{p_i\}, i=\overline{1, n}} \min, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i \geq P. \quad (10)$$

В общем случае значение целевой функции задачи (9), (10) $\Phi(z, P)$, где $z = \{z_i^j\}$ в оптимальном решении, является оценкой снизу целевой функции задачи (1)–(3).

Двойственная задача: определить z :

$$\max_z \Phi(z, P), \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n z_j^i = c, \quad i = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Теорема. $\Phi(z, P)$ — вогнутая функция.

Доказательство. Пусть векторы \tilde{z} и \tilde{z} — решения двойственной задачи (11), (12). Рассмотрим

вектор z — линейную комбинацию векторов \tilde{z} и \tilde{z} : $z = \alpha \tilde{z} + (1 - \alpha) \tilde{z}$, $0 \leq \alpha \leq 1$. Имеем:

$$\begin{aligned} \Phi(z, P) &= \min_{\{p_i\}} \left\{ \sum_{j=1}^n \min_{\{x_j\}} \left[\sum_{i=1}^n \alpha \tilde{z}_i^j x_i + (1 - \alpha) \tilde{z}_i^j x_i \right] \right\} \geq \\ &\geq \min_{\{p_i\}} \left\{ \sum_{j=1}^n \left[\min_{\{x_i\}, p_i\{\tilde{z}_i^j\}} \sum_{i=1}^n \alpha \tilde{z}_i^j x_i + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \min_{\{x_i\}, p_i\{\tilde{z}_i^j\}} \sum_{i=1}^n (1 - \alpha) \tilde{z}_i^j x_i \right] \right\} \geq \\ &\geq \min_{\{p_i\}} \left\{ \sum_{j=1}^n \min_{\{x_i\}} \sum_{i=1}^n \alpha \tilde{z}_i^j x_i \right\} + \\ &+ \min_{\{p_i\}} \left\{ \sum_{j=1}^n \min_{\{x_i\}} \sum_{i=1}^n (1 - \alpha) \tilde{z}_i^j x_i \right\} = \\ &= \alpha \Phi(\tilde{z}, P) + (1 - \alpha) \Phi(\tilde{z}, P). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\forall \alpha \in [0, 1]$$

$$\Phi(\alpha \tilde{z} + (1 - \alpha) \tilde{z}, P) \geq \alpha \Phi(\tilde{z}, P) + (1 - \alpha) \Phi(\tilde{z}, P).$$

А значит, функция $\Phi(z, P)$ — вогнутая.

2. ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ ПО ВРЕМЕНИ

Для решения задачи оптимизации портфеля проектов по времени воспользуемся алгоритмом, описанным в работе [5]. Представим портфель взаимозависимых по времени выполнения проектов в виде сетевого графика. Вершины соответствуют проектам портфеля, дуги — рекомендательным зависимостям между ними. Под зависимостями между проектами будем понимать определенные ограничения на порядок их выполнения: наличие зависимости (i, j) подразумевает начало выполнения проекта j после завершения проекта i . Такая зависимость носит рекомендательный характер, т. е. может нарушаться, однако в этом случае время выполнения проекта j увеличивается.

Введем следующие обозначения: τ_i — базовая длительность проекта; $a_{ij} \geq 0$ — увеличение продолжительности проекта j , если зависимость (i, j) нарушается.

Задача заключается в определении календарного плана с минимальной общей продолжительностью. Введем переменные y_{ij} , соответствующие зависимостям (i, j) : $y_{ij} = 0$, если зависимость (i, j)



нарушается, и $y_{ij} = 1$ — иначе. Теперь задачу формально можно записать следующим образом:

$$\max_{i=\overline{1,n}} t_i \xrightarrow{\{y_{ij}, i=\overline{1,n}, j=\overline{1,n}\}} \min,$$

$$t_j = \tilde{\tau}_j + \max_{i: y_{ij}=1} t_i,$$

$$\tilde{\tau}_j = \tau_j + \sum_{i=1}^n a_{ij}(1 - y_{ij}),$$

$$\tau_i > 0, \quad i = \overline{1,n}, \quad a_{ij} \geq 0, \quad \overline{1,n},$$

$$y_{ij} \in \{0; 1\}, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,n}.$$

Для решения может быть применен следующий алгоритм.

Шаг 1. Присваиваем всем проектам начальные индексы $\lambda_i = \tau_i$, $i = \overline{1,n}$.

Общий шаг. Рассматриваем каждый проект. Обозначим через Q_i — множество проектов, предшествующих проекту i , т. е. в сетевом графике существует дуга (j, i) для $j \in Q_i$. Обозначим через m_i — число дуг, заходящих в вершину i (число элементов множества Q_i). Рассмотрим все подмножества из m_i элементов (их число равно 2^{m_i}). Для каждого R_i — подмножества Q_i — вычисляем

$$t_i(R_i) = \tau_i + \max_{j \in R_i} \lambda_j + \sum_{j \notin R_i} a_{ji}$$

Определяем новый индекс вершины i

$$\lambda_i = \min_{R_i} t_i(R_i).$$

Алгоритм заканчивается, когда все индексы установятся.

Конечность алгоритма следует из того, что последовательность индексов для каждого i возрастающая. С другой стороны, индексы i ограничены сверху величиной

$$\lambda_i \leq \tau_i + \sum_{j \in Q_i} a_{ji}$$

а минимальное приращение — снизу величиной

$$\min(\min_j \lambda_j, \min_{i,j} a_{ij}).$$

Исходя из построения последовательности индексов λ_i , полученные на выходе алгоритма их значения определяют минимальные сроки завершения проектов, поскольку на каждом шаге значения λ_i представляют собой нижние оценки сроков завершения соответствующих проектов.

Заметим, что в результате последовательного применения общего шага ко всем вершинам сетевого графика (всего — n вершин) устанавливается, по крайней мере, один новый индекс (это следует из того, что в финальном сетевом графике портфеля проектов отсутствуют контуры). Следовательно, для завершения алгоритма, необходимо приме-

нить общий шаг не более чем $\sum_{i=1}^n i = n(n+1)/2$ раз,

выполняя на каждом шаге перебор 2^l подмножеств, где l — максимальная степень вхождения вершины в исходном сетевом графике ($l \leq n$). Таким образом, алгоритм заканчивается не более, чем за $On(n+1)2^{l-1}$ операций, где O — некоторая постоянная величина.

3. ПРИМЕР

Рассмотрим пять проектов со следующей матрицей взаимозависимостей между ними:

$$[d_{ij}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Затраты на выполнение проектов составляют $(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5) = (6, 2, 4, 3, 2)$. Ограничение на общий эффект от портфеля $P = 11$. Решим предложенным способом следующую задачу:

$$(6x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 3x_4 + 2x_5) \xrightarrow{\{x_i, i=\overline{1,5}\}} \min, \quad (13)$$

$$x_1(1 + x_3 + 2x_5) + x_2(1 + 2x_4) + x_3(x_1 + 4) + x_4(2x_2 + 3) + x_5(x_1 + 1) \geq 11, \quad (14)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если проект } i \text{ выполняется,} \\ 0 & \text{иначе; } i = \overline{1,5}. \end{cases} \quad (15)$$

В вершинах второго слоя сетевого представления задачи (13)—(15) будут решаться следующие задачи оптимизации:

$$1) (2x_1 + x_3 + x_5) \rightarrow \min, \quad 2) (2x_2 + x_4) \rightarrow \min,$$

$$x_1(1 + x_3 + 2x_5) \geq p_1; \quad x_2(1 + 2x_4) \geq p_2;$$

$$3) (2x_1 + x_3) \rightarrow \min, \quad 4) (2x_2 + x_4) \rightarrow \min, \quad 5) (2x_1 + x_5) \rightarrow \min,$$

$$x_3(x_1 + 4) \geq p_3; \quad x_4(2x_2 + 3) \geq p_4; \quad x_5(x_1 + 1) \geq p_5;$$

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 \geq 5.$$

В табл. 1 приведены решения данных задач в зависимости от значения параметра p . Полуцелым выделены наборы $(p, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, входящие в состав оптимального решения задачи (13)—(15).

Решение $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (1, 0, 1, 0, 1)$ является общим решением пяти приведенных задач и удовлетворяет ограничению (14), следовательно, оно является решением исходной задачи (13)—(15).

Таблица 1

**Решения задач оптимизации на втором слое
сетевом представлении**

Задача	p_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	Более 4	—	—	—	—	—
	4	1	(0; 1)	1	(0; 1)	1
	3	1	(0; 1)	0	(0; 1)	1
	2	1	(0; 1)	0	(0; 1)	(0; 1)
	1	1	(0; 1)	0	(0; 1)	0
0	0	(0; 1)	0	(0; 1)	0	
2	Более 3	—	—	—	—	—
	3	(0; 1)	1	(0; 1)	1	(0; 1)
	2	(0; 1)	1	(0; 1)	1	(0; 1)
	1	(0; 1)	1	(0; 1)	0	(0; 1)
0	(0; 1)	0	(0; 1)	0	(0; 1)	
3	Более 5	—	—	—	—	—
	5	1	(0; 1)	1	(0; 1)	(0; 1)
	4	0	(0; 1)	1	(0; 1)	(0; 1)
	3	0	(0; 1)	1	(0; 1)	(0; 1)
	2	0	(0; 1)	1	(0; 1)	(0; 1)
1	0	(0; 1)	1	(0; 1)	(0; 1)	
0	0	(0; 1)	0	(0; 1)	(0; 1)	
4	Более 5	—	—	—	—	—
	5	(0; 1)	1	(0; 1)	1	(0; 1)
	4	(0; 1)	1	(0; 1)	1	(0; 1)
	3	(0; 1)	0	(0; 1)	1	(0; 1)
	2	(0; 1)	0	(0; 1)	1	(0; 1)
1	(0; 1)	0	(0; 1)	1	(0; 1)	
0	(0; 1)	0	(0; 1)	0	(0; 1)	
5	Более 2	—	—	—	—	—
	2	1	(0; 1)	(0; 1)	(0; 1)	1
	1	0	(0; 1)	(0; 1)	(0; 1)	1
0	0	(0; 1)	(0; 1)	(0; 1)	0	

Для решения задачи оптимизации полученного портфеля проектов по времени необходимо задать соответствующие параметры. Пусть базовые длительности проектов и их взаимосвязи заданы сетевым графиком рис. 2. Вершины соответствуют рассматриваемым проектам, дуги — рекомендательным зависимостям между ними.

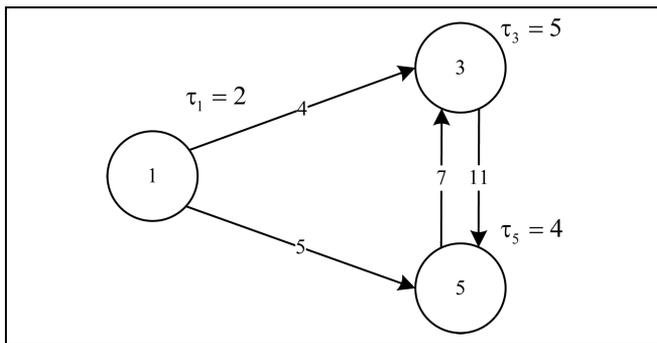


Рис. 2. Пример сетевого графика с рекомендательными зависимостями

Шаг 1. Присваиваем всем проектам начальные индексы $\lambda_i = \tau_i$, $i = \overline{1, n}$ (табл. 2):

Таблица 2

Начальные индексы вершин на первом шаге

i	1	3	5
λ_i	2	5	4

Рассматриваем вершину 3: в нее заходят дуги (1, 3) и (5, 3).

Таблица 3

Возможные реализации проектов на первом шаге

(1, 3)	(3, 5)	$\max_{j \in R_i} \lambda_j + \sum_{j \in R_i} a_{ji}$	$\tau_i + \max_{j \in R_i} \lambda_j + \sum_{j \in R_i} a_{ji}$
0	0	11	16
0	1	8	13
1	0	9	14
1	1	4	9

Все возможные реализации проектов с учетом этих дуг представлены в табл. 3. В столбцах, соответствующих дугам, 1 указывает на то, что дуга учитывается, 0 — не учитывается. Таким образом, на данном этапе выгоднее учитывать обе зависимости. Новый индекс для третьей вершины равен $\lambda_3 = 9$. На этом шаг 1 алгоритма закончен.

Шаги 2—4. Аналогично производим расчеты для шагов 2, 3 и 4. Результаты приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Возможные реализации проектов

Шаг	Вершина	Входящие дуги		$\max_{j \in R_i} \lambda_j + \sum_{j \in R_i} a_{ji}$	$\tau_i + \max_{j \in R_i} \lambda_j + \sum_{j \in R_i} a_{ji}$
		(1, 3)	(3, 5)		
2	5	(1, 5)	(3, 5)	—	—
		0	0	16	20
		0	1	14	18
		1	0	13	17
		1	1	9	13
3	3	(1, 3)	(5, 3)	—	—
		0	0	11	16
		0	1	17	22
		1	0	9	14
		1	1	13	18
4	5	(1, 5)	(3, 5)	—	—
		0	0	16	20
		0	1	19	23
		1	0	13	17
		1	1	14	18
5	3	(1, 3)	(5, 3)	—	—
		0	0	11	16
		0	1	21	26
		1	0	9	14
		1	1	17	22



Таблица 5

Значения индексов для каждого проекта

Шаг	Проект 1	Проект 3	Проект 5
2	2	9	4
3	2	9	13
4	2	14	13
5	2	14	17

Шаг 5. На данном шаге индексы установлены, и алгоритм закончен. Из табл. 4 следует, что в оптимальной реализации учитываются зависимости (1, 3) и (1, 5) и не учитываются зависимости (3, 5) и (5, 3). Сетевой график, соответствующий оптимальной реализации приведен на рис. 3.

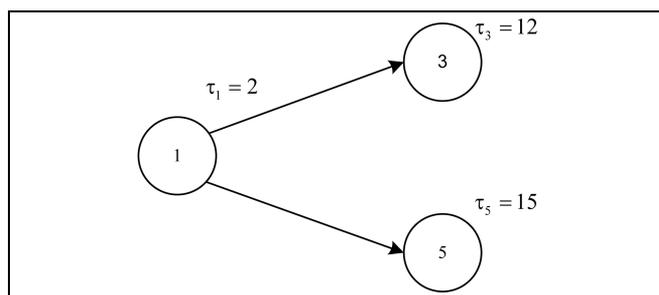


Рис. 3. Сетевой график оптимальной реализации портфеля проектов

Итак, минимальное время реализации портфеля 17. Продолжительность проекта 3 увеличилась на 7, а проекта 5 — на 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен подход к оптимизации портфеля взаимозависимых в части доходов проектов, основанный на применении метода сетевого програм-

мирования, и предложен алгоритм формирования оптимального по времени портфеля проектов. Перспективными представляются следующие направления дальнейших исследований:

- рассмотрение алгоритма решения двойственной задачи;
- анализ качества полученной оценки снизу целевой функции задачи формирования портфеля проектов;
- применение сетевых методов для решения задачи формирования оптимального портфеля ресурсно-взаимозависимых проектов и построения плана реализации такого портфеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В. Модели и методы управления портфелями проектов. — М.: ПМСОФТ, 2005. — 206 с.
2. Царев В.В. Оценка экономической эффективности инвестиций. — СПб.: Питер, 2004. — 464 с.
3. Бурков В.Н., Буркова И.В. Метод дихотомического программирования // Теория активных систем / Тр. междунар. науч.-практ. конф. (17–19 ноября 2003 г., Москва, ИПУ РАН). — М., 2003. — Т. 1. — С. 25–26.
4. Бурков В.Н., Буркова И.В. Метод сетевого программирования // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 25–27.
5. Математические основы управления проектами / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, И.В. Буркова и др. — М.: Высшая школа, 2005.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Недовесов Максим Васильевич — аспирант,
✉ MNedovesov@gmail.com,

Руденко Зоя Геннадьевна — аспирант,
✉ rudenkoz@rambler.ru,

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



С 24 по 26 октября 2012 г. в Москве состоится VI международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» (РАСО'2012). Конференция проводится Институтом проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН при поддержке Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Российского национального комитета по автоматическому управлению, Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации, Российского фонда фундаментальных исследований, ЗАО «Оракл Компьютерное Оборудование» и компании «РОЙ Интернэшнл Консалтанси, Инк».

Научные направления конференции

- Математические модели и вычислительные методы распараллеливания вычислений
- Технологии программирования параллельных и распределенных систем
- Параллельные и распределенные вычисления в задачах моделирования, идентификации, анализа, управления и оптимизации
- Проблемы интеграции данных, программ, процессов и систем в глобальной компьютерной среде
- Мультиагентная парадигма организации параллельных вычислений и распределенной обработки информации
- Надежные вычисления и защита информации в распределенных компьютерных средах
- Проекты вычислительных и управляющих систем с параллельной и/или распределенной обработкой информации
- Архитектуры распределенных вычислительных и управляющих систем в компьютерных сетях

Более подробную информацию можно найти на сайте <http://raso.ipu.ru>.

ЭКСПРЕСС-МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ БИЗНЕСА

О.И. Дранко

Рассмотрена модель экспресс-расчета стоимости бизнеса путем оценки будущих денежных потоков с помощью метода финансового прогнозирования. В качестве основных параметров приняты показатели на базе общедоступной финансовой отчетности. Приведен пример расчета стоимости одной из крупнейших российских компаний и дано сопоставление с рыночными оценками. Сделан вывод о приемлемой точности экспресс-модели.

Ключевые слова: оценка стоимости бизнеса, финансовое прогнозирование, движение денежных средств.

ВВЕДЕНИЕ

Многие предприятия нашей страны активно развиваются, ставят цель увеличения объемов продаж, и добиваются их роста на 30—50 % в год. Технология формирования системы сбалансированных показателей позволяет конкретизировать эти цели на различных уровнях управления.

Руководители российских компаний в качестве основной цели часто называют «прибыль». Целевой показатель «прибыль» выглядит анахронизмом, который объясняется историческими причинами (привычный с советских времен, включен в уставы при быстрой приватизации начала 1990-х гг.) и квалификацией российских менеджеров (простота расчета). Из недостатков укажем, что прибыль — краткосрочный показатель (год, квартал, месяц), поэтому не очень подходит для целей развития. Отметим, что реализация инвестиционных проектов увеличивает затраты и уменьшает прибыль (в ближайшей перспективе), что зачастую демотивирует менеджеров.

Предпочтительная цель — увеличение капитализации¹ (стоимости бизнеса). Рабочее затруднение заключается в том, что однозначных способов расчета стоимости бизнеса нет, наиболее распространенные способы требуют знания внутренней информации о возможностях развития предпри-

ятия (что внешним инвесторам редко доступно). Прогнозирование движения денежных средств для оценки стоимости доходным методом — достаточно объемная задача, требует больших и кропотливых расчетов. Экспресс-метод прогнозирования на базе финансовой отчетности позволяет упростить формирование прогноза движения денежных средств.

В современном информационном обществе заметно возрастают скорости операций, коммуникаций, принятия решений, поэтому роль экспресс-методов увеличивается. Они предоставляют возможность принятия решений одновременно с их выработкой.

Из распространенных методов экспресс-оценки стоимости выделим:

— применение коэффициентов (мультипликаторов), рассчитанных по аналогичным предприятиям по выручке, прибыли или натуральным показателям (киловатт мощности, баррель запасов); сюда же отнесем «капитализацию» дохода — фактически, множитель к прибыли,

— оценку по чистым активам, рассчитываемым как разность активов и долгов. Используется информация финансовой отчетности.

Данные методы позволяют оценить стоимость «в одну строку (формулу)», однако не позволяют рассматривать варианты будущего. Предлагаемый в статье экспресс-метод ориентируется на небольшой набор исходных данных, но предполагает «видение будущего» и возможность изменения параметров для управления стоимостью.

¹ Капитализация может рассматриваться как для компании в целом, так и как богатство акционеров [1]. В целях данной статьи существенна переориентация с прибыли на стоимость.



Анализ опыта повышения стоимости для российских предприятий (на текущем этапе их развития) показывает, что наиболее важны мероприятия по:

- снижению рисков, прежде всего — корпоративного управления;
- повышению темпов роста продаж;
- управлению инвестициями, прежде всего — в оборотные активы.

1. ЭКСПРЕСС-МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕНЕЖНЫХ ПОТОКОВ

Модель прогнозирования финансовой отчетности описана в содержательных терминах в нескольких источниках [2], но пока широко не применяется специалистами финансово-экономических служб предприятий. В данной статье используется модель прогнозирования денежных потоков на основе финансовой отчетности [3, 4].

Рассмотрим модель, увязывающую баланс и отчет о доходах/расходах предприятия. Опишем баланс предприятия через совокупность балансовых статей: внеоборотных активов FA , собственного оборотного капитала² WC (равного разности оборотных активов CA и текущих пассивов CL), чистого долга³ D и собственного капитала E .

Равенство активов и пассивов $FA + CA = CL + D + E$ или $FA + WC = E + D$ играет роль финансового «закона сохранения», «инварианта» системы.

Заметим, что есть ключевая связь, увязывающая два основных финансовых документа: баланс и план по прибылям/убыткам. Она состоит в увеличении собственного капитала на размер нераспределенной прибыли NI :

$$\Delta E = NI = (S - C)(1 - \gamma) = S(1 - k_C)(1 - \gamma), \quad (1)$$

где S — объем продаж, C — затраты, k_C — удельные полные затраты, γ — доля чистой прибыли на потребление (выплату дивидендов).

Свободный денежный поток CF предприятия формируется при превышении пассивов над активами (косвенная форма движения денежных средств). В терминах приращений

$$CF = -(\Delta FA + \Delta WC - \Delta D - \Delta E). \quad (2)$$

Конкретный вид модели прогнозирования отдельных статей может различаться у различных предприятий.

² Называют чистым оборотным капиталом или работающим капиталом (working capital).

³ Под чистым долгом (далее — долгом) будем понимать разницу кредитов и денежных средств.

Один из наиболее простых вариантов модели прогнозирования — рост статей оборотных активов и текущих пассивов пропорционально объему продаж. Для многих предприятий «устойчивыми» являются коэффициенты оборачиваемости оборотных активов и текущих пассивов [2, 3, 5], а объем продаж — величина, задаваемая извне. В этом случае $\Delta WC = \Delta S k_{WC}$, где $k_{WC} = WC/S$ — срок оборачиваемости собственного оборотного капитала.

Прогнозирование инвестиций во внеоборотные активы связано с задачами развития на последующие периоды и напрямую не связано с текущей и прошлой деятельностью, результаты будут получены через несколько лет благодаря реализации инвестиционных проектов. Исследования показали, что для крупного бизнеса США активы изменяются пропорционально объему продаж [6], т. е. можно принять $\Delta FA = k_{FA} \Delta S$, где $k_{FA} = FA/S$ — фондоотдача.

Во внеоборотные активы входят долгосрочные финансовые вложения, которые являются инвестициями в дочерние общества, и основной технологический процесс проходит в дочерних обществах. Для упрощения модели (для производственных компаний) эту часть рассматривать не будем.

После простых преобразований из выражений (1) и (2) получаем $CF = S(1 - k_C)(1 - \gamma) - k_{FA} \Delta S - k_{WC} \Delta S + \Delta D$.

Политик изменения долга может быть несколько:

— пассивная: сохранение размера долга, т. е. $\Delta D = 0$;

— консервативная: сохраняется пропорция между собственным капиталом и долгом; в этом случае долг пропорционален активам и объему продаж;

— ускоренный возврат долга: свободные денежные средства направляются на погашение долга, при необходимости — долг наращивается. В этом случае свободный денежный поток $CF = 0$, если $D > 0$.

Тогда для пассивной политики изменения долга $\Delta D = 0$, используя коэффициент $k_S = \Delta S/S$ — темп роста объемов продаж, получаем

$$CF = S\{(1 - k_C)(1 - \gamma) - k_S(k_{FA} + k_{WC})\} = S k_{CF}, \quad (3)$$

где $k_{CF} = (1 - k_C)(1 - \gamma) - k_S(k_{FA} + k_{WC})$.

2. ЭКСПРЕСС-МОДЕЛЬ СТОИМОСТИ ПО ДИСКОНТИРОВАННЫМ ДЕНЕЖНЫМ ПОТОКАМ

Как правило, рассматриваются три метода оценки стоимости:

- затратный (по чистым активам);

— с применением мультипликаторов (по аналогам);

— доходный, по дисконтированным денежным потокам.

Установлено [7], что наиболее высокую корреляцию с рыночной стоимостью бизнеса показывают результаты, полученные методом дисконтирования денежных потоков:

$$EV = MC + D = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{CF_t}{(1+r)^t},$$

где EV — стоимость бизнеса, MC — стоимость акционерного капитала, D — долг, r — ставка дисконтирования, t — индекс времени.

При проведении оценки наиболее распространен подход, состоящий в следующем.

1. Стоимость компании разбивается на два периода, прогнозный и постпрогнозный.

2. В прогнозном периоде строится прогноз денежных потоков в явном виде. Основная идея данного подхода — прогнозирование движения денежных средств на базе финансовой отчетности на несколько последовательных лет.

3. В постпрогнозном периоде делается предположение о фиксированной скорости роста денежного потока g в течение всего периода:

$$\begin{aligned} MC + D &= \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=N+1}^{\infty} \frac{CF_t}{(1+r)^t} = \\ &= EV_1 + EV_2, \end{aligned}$$

где EV_1 и EV_2 — стоимость бизнеса в прогнозный и постпрогнозный периоды соответственно.

Подставляя в формулу EV_1 денежный поток (3), получаем

$$EV_1 = \sum_{t=1}^N \frac{S_t k_{CF,t}}{(1+r)^t}.$$

При постоянстве параметров системы стоимость EV_1 выражается как сумма геометрической прогрессии:

$$\begin{aligned} EV_1 &= S_0 \sum_{t=1}^N \frac{(1+k_S)^t k_{CF,t}}{(1+r)^t} = \\ &= k_{CF} S_0 \frac{1+k_S}{r-k_S} \left(1 - \left(\frac{1+k_S}{1+r} \right)^N \right), \end{aligned}$$

где S_0 — объем продаж в 0-й год.

Стоимость бизнеса в постпрогнозный период при $r > g$

$$\begin{aligned} EV_2 &= \sum_{t=N+1}^{\infty} \frac{CF_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=N+1}^{\infty} \frac{CF_{N+1}(1+g)^{t-N-1}}{(1+r)^t} = \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{CF_{N+1}(1+g)^{j-1}}{(1+r)^N(1+r)^j} = \frac{CF_{N+1}}{(1+r)^N(r-g)}. \end{aligned}$$

Таким образом, экспресс-модель оценки стоимости в аналитическом виде при постоянстве параметров системы и для пассивной заемной политики выражается формулой:

$$\begin{aligned} EV &= EV_1 + EV_2 = \\ &= \frac{k_{CF} S_0 (1+k_S)}{r-k_S} * \left(1 - \left(\frac{1+k_S}{1+r} \right)^N \frac{k_S-g}{r-g} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Экспресс-моделью в виде (4) можно пользоваться для аналитических исследований.

Дополнительные расчеты (оценки) требуются для определения ставки дисконтирования, но ее детальные исследования выходят за рамки данной статьи. Наиболее распространенная оценка ставки дисконтирования заключается в суммировании стоимости финансирования и надбавки за риск. Но рабочие модели значительно различаются, прежде всего, по обеспечению информацией. Как правило, применяется взвешенная комбинация следующих методов.

- Кумулятивный метод⁴, при котором ставка дисконтирования определяется по формуле Фишера $r_d = r_{б.р} + r_{инф} + r_{риск}$, где r_d — ставка дисконтирования, $r_{б.р}$ — доходность безрисковых ценных инвестиций при отсутствии инфляции, $r_{инф}$ — инфляция, $r_{риск}$ — надбавка за риск. Рассматриваются экспертные оценки премий 0–5 % за некоторые виды риска, часто выделяют наличие ключевой фигуры, размер компании, структуру капитала, товарную и территориальную диверсификации, диверсификация клиентуры, прогнозируемость прибыли, прочие риски (например, геологоразведочные, НИОКР).

- Метод средневзвешенной стоимости капитала (Weighted Average Cost of Capital — WACC). Предполагается, что риски уже заложены в стоимость финансирования по собственному и заемному капиталу.

- Метод и модели оценки финансовых активов (Capital Assets Pricing Model — CAPM). Устанавливается зависимость доходности актива (ценной

⁴ Часто ссылаются как на метод консультационной фирмы «Deloitte Touche Tohmatsu Limited».



Таблица 1

Оценка денежного потока, млн долл.

Прогнозный период	Факт, 2010 г.	Прогноз, 2011 г.	Прогноз, 2012 г.	Прогноз, 2013 г.	Постпрогнозный период
Выручка	104 956	136 443	177 376	230 588	299 765
Полные затраты	-95 950	-123 996	-160 455	-207 853	-269 469
Чистая прибыль	9 006	12 447	16 920	22 736	30 295
Оборотные активы	20 617	26 802	34 843	45 296	58 884
Текущие пассивы	8 650	11 178	14 465	18 738	24 293
Собственный оборотный капитал	11 967	15 624	20 378	26 557	34 591
Вложения в оборотные активы	—	-3657	-4754	-6180	-8034
Инвестиции в основные средства	-6340	-6340	-6340	-6340	-6340
Денежный поток инвестиций и долгов	-6340	-9997	-11 094	-12 520	-14 374
Чистая прибыль — инвестиции — долги	2666	2450	5827	10 216	15 922

бумаги) $r_{\text{актив}}$ от доходности $r_{\text{рынка}}$ рынка в целом через коэффициент корреляционной зависимости $\beta_{\text{актив}}$: $r_{\text{актив}} = r_{\text{б.р.}} + \beta_{\text{актив}} (r_{\text{рынка}} - r_{\text{б.р.}})$, $r_{\text{актив}}$ — доходность определенного актива (например, акции компании), где $r_{\text{б.р.}}$ — безрисковая доходность (часто принимается по краткосрочным облигациям правительства США — до понижения рейтинга США), $r_{\text{рынка}}$ — доходность, обеспечиваемая рынком в среднем (например, если мы проинвестируем средства сразу во все компании, входящие в индекс Доу—Джонса), $\beta_{\text{актив}}$ — коэффициент «бета» рискованности данного актива. Метод предполагает наличие статистики между доходностью актива и рынка, «работает» для компаний, котирующихся на фондовом рынке. Отметим, что не используется коэффициент α (постоянный член регрессионной зависимости), хотя он сильнее влияет на тренд изменения курса акций.

3. ПРИМЕР ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ

Для примера рассматривается одна из крупнейших компаний России — ОАО «Лукойл». Оценка денежных потоков сделана косвенным методом на основании экспресс-модели финансового прогнозирования. Для расчетов разработана программа в Excel. Результаты оценки приведены в табл. 1.

Исходная информация и предположения:

— данные бухгалтерского учета за 2010 г. (отчет в соответствии с общепринятыми правилами бухгалтерского учета США);

— среднегодовые темпы роста объема продаж 30 % (среднегодовой рост выручки за период 2002—2010 г. составляет 24 %, до кризиса он составлял 32,6 %);

— доля переменных затрат от выручки составляет 89 %;

— вложения во внеоборотные средства приняты на уровне 10 % от остаточной стоимости, что соответствует среднему росту внеоборотных активов;

— срок оборачиваемости текущих активов и пассивов оценивается от выручки;

— темп роста компании в постпрогнозный период (g) — 3 %;

— средневзвешенная ставка дисконтирования в расчете принята 15 % (по цене капитала — 20 %, по кумулятивному методу — 15 %, по методу CAPM («бета») — 10 %).

На основе полученных оценок денежных потоков рассчитана капитализация компании (табл. 2).

Обратим внимание, что постпрогнозная стоимость значительно выше стоимости в прогнозный период.

На 15.06.2011 по данной компании на сайте www.rbc.ru было представлено 17 оценок цены акции, со средней

Таблица 2

Оценка капитализации компании, млн долл.

1.1	Рыночная стоимость*	50 388
1.2	Консенсус-прогноз, на 11.01.2011	62 927
1.3	Средневзвешенная стоимость	74 593
2	Чистые активы**	59 608
3	Мультипликатор по EBITDA ⁵	88 821
4	Дисконтированные денежные потоки	75 349
4.1	Прогнозная стоимость — прибыль	38 567
4.2	Прогнозная стоимость — инвестиции	-25 313
4.3	Постпрогнозная стоимость — прибыль	144 346
4.4	Постпрогнозная стоимость — инвестиции	-66 491
4.5	Долги	15 759
<p>Примечания: * — www.rbc.ru, на 11.01.2011; ** — собственный капитал.</p>		

ценой 82,24 долл. и среднеквадратичным отклонением 11,46 долл., что составляет 13,6 % [8]. Расчеты по экспресс-модели отличаются от среднего значения консенсус-прогноза на 16 %. Таким образом, для экспресс-оценки рассматриваемая модель показывает приемлемую точность.

4. ФАКТОРЫ УПРАВЛЕНИЯ СТОИМОСТЬЮ

Сформированная модель оценки стоимости позволяет в оперативном режиме выработать мероприятия по целенаправленному развитию бизнеса.

Для понимания возможности влияния на оценку справедливой капитализации бизнеса были выполнены расчеты чувствительности капитализации бизнеса при изменении его параметров. Компактность экспресс-модели позволяет провести соответствующий анализ за короткое время. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что наиболее существенное влияние оказывают сокращение удельных затрат и уменьшение ставки дисконтирования (факторы риска, корпоративного управления). Результаты комплексного сценария превышают сумму влияния отдельных факторов из-за синергии влияния показателей.

Очень большое влияние удельных полных затрат обусловлено достаточно большими переменными затратами (около 90 %), поэтому сокращение полных затрат на 1 % приводит к значительному увеличению прибыли и денежного потока.

Таблица 3

Влияние изменения различных факторов бизнеса на его капитализацию

Фактор	Текущее значение, %	Изменение, %	Изменение капитализации, млн долл.
Темп роста продаж	30	1	2983
Сокращение удельных затрат	0	-1	55 328
Сокращение срока оборачиваемости оборотных активов	0	1	3233
Инвестиции во внеоборотные активы	10	1	4380
Уменьшение ставки дисконтирования	15	1	10 372
Комплексный сценарий	—	1	85 902

Таблица 4

Влияние на капитализацию достижения целевых значений, млн долл.

Фактор	Текущее значение, %	Целевое значение, %	Полное изменение капитализации, млн долл.
Темп роста продаж	30	32	6,008
Сокращение удельных затрат	0	-0,5	27,855
Сокращение срока оборачиваемости оборотных активов	0	-3	9,323
Инвестиции во внеоборотные активы	10	11	-4,380
Уменьшение ставки дисконтирования	15	14	10,372
Комплексный сценарий	—	—	56,912

Результаты моделирования изменения капитализации бизнеса при достижении целевых (желательных) параметров в течение трех последовательных лет представлены в табл. 4. Видно, что при достижении целевых значений стоимость компании может фактически удвоиться. Наиболее существенное влияние оказывают сокращение удельных полных затрат и уменьшение ставки дисконтирования (уменьшение рисков, развитие корпоративного управления).

Модельные исследования позволяют выделить основные направления желательных изменений. Но вопрос практической реализуемости зачастую остается открытым. В российской литературе не очень много материалов по повышению внутренней эффективности предприятий. Выделим работы под руководством В.А. Ирикова, например, [9]. На конкретных примерах описываются комплексы мероприятий по увеличению объема продаж, сокращения затрат, управлению оборотными средствами. По управлению ставкой дисконтирования и влиянию на нее можно выделить единичные работы, в частности [10]. Это тема будущих исследований.

5. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ

Для крупных компаний, котирующихся на бирже, оценки стоимости проводятся многими аналитиками, и многие факторы учитываются достаточно детально. Для средних компаний таких оценок практически нет, и экспресс-модель может существенно упростить расчеты.



Отметим возможность учета отраслевой специфики в данной модели. В рамках одной отрасли, как правило, применяются похожие технологии как производства, так и управления. Удельные расходы и сроки оборачиваемости являются следствием технологий производства работ управления и учитываются:

- материалоемкость, энергоемкость, трудоемкость продукции и размер обслуживающей инфраструктуры (долю накладных расходов) влияют на удельные расходы;

- технологический цикл производства продукции связан со сроком оборачиваемости незавершенного производства;

- бизнес-процесс закупок и продаж связан со сроком оборачиваемости запасов сырья и готовой продукции, дебиторской и кредиторской задолженности;

- потребность в инвестициях в основные средства явно зависит от специфики отрасли.

При расчетах автор в значительной мере ориентируется на соответствие расчетных параметров качественному содержательному анализу, и в какой-то мере это же выступает методом верификации финансовой отчетности (да простят меня аудиторы! — *О.Д.*). Например, для рыболовецкой отрасли характерны невысокие (30—50 %) доли переменных затрат и, как следствие, высокая прибыльность при приросте объема продаж. Нефтяная отрасль (с учетом всех видов налогов, включая налог на добычу полезных ископаемых) характеризуется переменными затратами на уровне 90 %.

Область применения модели охватывает компании:

- крупные и средние;
- материального производства (не финансовые), со сложившимся бизнес-процессом;
- достаточно инерционные, с постепенным (не взрывным) ростом;
- с консервативной или пассивной заемной политикой;
- с умеренными рисками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная модель финансового прогнозирования позволяет:

- за приемлемое время оценить «справедливую» стоимость бизнеса;
- оценить реализуемость планов максимального роста компании и выявить их влияние на денежные потоки предприятия, а значит — на потребность в дополнительном финансировании, прежде всего оборотного капитала;

- определить рациональные значения параметров развития бизнеса;

- выделить наиболее существенные факторы, влияющие на стоимость бизнеса;

- оценить влияние мероприятий по развитию на стоимость бизнеса, и тем самым позволить сформировать программу повышения стоимости бизнеса.

В качестве критериев применения такой модели выступают следующие:

- подавляющее число параметров определяется по общедоступной финансовой отчетности;

- простой качественный состав используемых параметров (что упрощает принятие решений собственниками и топ-менеджерами);

- возможность проведения вариантных расчетов за небольшое время (например, в целях их обсуждения с лицами, принимающими решения).

Таким образом, данная модель позволяет решать задачу повышения стоимости бизнеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черемушкин С.В. Максимизировать богатство, а не стоимость // Финансы и кредит. — 2008. — № 33. — С. 45—58.
2. Брейли Р., Майерс С. Принципы корпоративных финансов. — М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2004.
3. Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. — 2007. — № 1. — С. 37—40.
4. Дранко О.И., Романов В.С. Выбор стратегии роста компании на основании критерия максимизации ее стоимости: непрерывный случай // Исследовано в России. — 2006. — № 117. — С. 1107—1117.
5. Дранко О.И., Кислицына Ю.Ю. Многоуровневая модель финансового прогнозирования деятельности предприятия // Управление социально-экономическими системами: Сб. науч. тр. — М., 2000. — С. 209—221.
6. Дранко О.И., Филимонов В.С. Оценка темпов роста бизнеса по экспериментальным данным // Управление большими системами: Сб. науч. тр. — Магнитогорск, 2011.
7. Коупленд Т., Колер Т., Мури Д. Стоимость компаний: оценка и управление. — М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005.
8. Прогнозы и рекомендации профучастников по российским акциям. — URL: <http://consensus.rbc.ru/shares/#> (дата обращения: 15.06.2011).
9. IPO и стоимость российских компаний: мода и реалии / В.Г. Балашов и др. — М.: Дело, 2008. — 336 с.
10. Корпоративное управление в российской промышленности / С.М. Гуриев и др. — М.: ИЭПП, 2004. — С. 92.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.М. Нижегородцевым.

Дранко Олег Иванович — канд. физ.-мат. наук, зам. зав. кафедрой, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, ☎ (495) 576-40-22, ✉ olegdranko@gmail.com.

СТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОРРУПЦИИ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Г.А. Угольницкий, А.Б. Усов

Рассмотрены статические модели коррупции в трехуровневых системах контроля качества речных вод. Исследованы различные виды коррупции (вымогательство, попустительство) при разных методах иерархического управления (принуждение, побуждение). Предусмотрена возможность наказания за дачу и получение взятки. На модельных примерах проиллюстрированы методы борьбы с коррупцией.

Ключевые слова: коррупция, попустительство, вымогательство, принуждение, побуждение, иерархическая система.

ВВЕДЕНИЕ

Коррупция — важнейшее социально-экономическое явление, оказывающее в основном негативное влияние на развитие общества. В современной России коррупция представляет угрозу успешным экономическим и социальным преобразованиям. Она возникает в иерархических системах управления различной структуры и природы. Коррупционной называется разновидность оппортунистического поведения, при которой субъект использует ресурсы вышестоящего субъекта не для решения его задач, а для достижения собственных целей. Под государственной коррупцией понимается дача и получение взяток должностными лицами в обмен на предоставление различных привилегий и льгот. Экономические потери от коррупции значительно шире и глубже, чем просто суммарный размер взяток. Главные потери происходят из-за тех решений, которые принимаются агентами, вступающими в коррупционные отношения.

Системное, комплексное модельное исследование коррупции началось в конце прошлого столетия с работы [1], где указаны причины возникновения, существования и развития коррупции, ее характерные черты. Сегодня имеется значительное число работ, посвященных математическому моделированию явления коррупции. В большинстве из них коррупция исследуется в рамках модели «контролирующий орган — взяточник — взяткодатель» (модель «принципал — агент — клиент»)

или ее различных вариаций. В работах [1—4] в рамках модели «агент — клиент» рассматривается государственная коррупция (распределение чиновниками государственных ресурсов в своих интересах) и ее различные модификации, например, по отношению к налоговым органам [5, 6]. В работах [7, 8] исследуются модели типа «принципал — агент», анализируются возможные стратегии поведения принципала. Отдельные моменты коррупции как социально-экономического явления, в том числе, ее психологические и политические стороны, изучаются в работах [9, 10]. Обзор литературы, посвященной математическому моделированию коррупции, изучению ее корней, причин возникновения, характерных черт, приведен в работах [11, 12]. Исследование коррупции в теоретико-игровой постановке в иерархических структурах проводится в работах [3, 4, 7, 13, 14]. Несмотря на значительное число работ, посвященных вопросам коррупции, математических моделей коррупции немного, в большинстве своем они ограничены исследованием двухуровневых моделей без учета стратегических целей развития систем, условия их гомеостаза.

В настоящей статье коррупция моделируется на основе теоретико-игрового подхода, концепции иерархического управления развитием эколого-экономических систем и поддержания их в гомеостазе [15, 16]. Рассмотрение ведется на примере трехуровневой модели контроля качества водных ресурсов (модель типа «принципал — агент — клиент»).



1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД

Построим математическую модель системы контроля качества речных вод без учета возможной коррумпированности системы. Моделирование проведем на примере трехуровневой веерной системы управления [16], включающей в себя источники воздействия верхнего (федеральный центр, ФЦ), среднего (местные органы управления, ОУ), нижнего (промышленные предприятия, ПП) уровней и управляемую систему (УС). Пусть взаимоотношения между элементами исследуемой системы устроены следующим образом: ФЦ воздействует на ОУ и ПП, ОУ на ПП, а ПП на УС.

Предполагается, что принята следующая совокупность правил относительно поведения и информированности различных субъектов управления:

- федеральный центр выбирает свою стратегию поведения первым (делает ход первым) и сообщает ее всем остальным субъектам управления; при этом он максимизирует свою целевую функцию на множестве тех стратегий, которые позволяют поддерживать УС в гомеостазе; предполагается, что ему известны целевые функции всех остальных субъектов управления;

- органы управления выбирают свою стратегию, когда выбор ФЦ уже известен; они стремятся к достижению своих целей, зная целевые функции ПП;

- промышленные предприятия делают ход при известных стратегиях всех остальных субъектов управления и стремятся к максимизации своих целевых функций, не обращая внимания на состояние УС.

Органы управления определяют размеры платы за сброс ПП загрязнений в водоток (метод побуждения) или минимально допустимые степени очистки сточных вод на ПП (метод принуждения). Федеральный центр должен поддерживать УС в гомеостазе, т. е. обеспечить непревышение предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) в речной системе. Он определяет размер средств, полученных от ПП в виде платы за сброс загрязнений в водоток, которые передаются ОУ. В качестве методов управления в системе применяются методы побуждения и принуждения [15].

Исследуется случай одного вида загрязнений, например, азотосодержащих ЗВ и одного ПП. Пусть система находится в гомеостазе, если выполнены стандарты качества речной

$$0 \leq B \leq B_{\max} \quad (1)$$

и сточных вод, сбрасываемых в водоток на ПП,

$$W(1 - P)/Q^0 \leq Q_{\max}, \quad (2)$$

где B — концентрация ЗВ в речной воде; Q^0 — расход воды на ПП; W — количество ЗВ, сбрасываемых в реку до очистки сточных вод; P — доля ЗВ, удаляемых из сточных вод на ПП в процессе их очистки; значения B_{\max} и Q_{\max} заданы.

Пусть концентрация ЗВ в речной системе рассчитывается по формуле

$$B = B_0 + kW(1 - P), \quad B_0, k = \text{const.} \quad (3)$$

Основная цель ФЦ заключается в поддержании системы в гомеостазе. Помимо этого, он стремится к максимизации целевой функции вида

$$J_0 = (1 - P)WF(T)(1 - H) - C_\Phi(y) \rightarrow \max_H \quad (4)$$

Здесь $y = W(1 - P)$ — общее количество сброшенных в реку загрязнений; $F(T)$ и T — соответственно функция платы и размер платы за единицу сброшенных ЗВ при отсутствии коррупции в системе; H — доля платы за сброс загрязнений, отдаваемая ОУ; $C_\Phi(y)$ — функция, отражающая материальные потери общества из-за загрязненной воды; функции $F(T)$ и $C_\Phi(y)$ являются возрастающими функциями своих аргументов, причем $F(0) = C_\Phi(0) = 0$.

Органы управления стремятся к максимизации своего дохода. Целевая функция ОУ имеет вид

$$J_y = (1 - P)WF(T)(H - C_0(y)) \rightarrow \max \quad (5)$$

Здесь $C_0(y)$ — функция затрат ОУ на улучшение качества речной воды, зависящая от общего количества сброшенных в реку загрязнений y ; она возрастает по y , и $C_0(0) = 0$.

Органы управления выбирают размер платы за сброс загрязнений в водоток или минимально допустимые степени очистки сточных вод на ПП. Критерий (5) максимизируется по одной переменной: по q — при принуждении (q — минимально допустимая степень очистки сточных вод на ПП) или по T — при побуждении.

Цель ПП состоит в максимизации своей прибыли, т. е.

$$J_{\text{ПП}} = zR(\Phi) - (1 - P)WF(T) - WC_{\text{ПП}}(P) \rightarrow \max_P \quad (6)$$

где Φ — производственные фонды; $R(\Phi)$ — производственная функция ПП; z — прибыль предприятия от реализации единицы произведенной продукции; $C_{\text{ПП}}(P)$ — функции затрат ПП на очистку единицы сбрасываемых загрязнений, причем она возрастает по P на отрезке $[0, 1]$, кроме того, $C_{\text{ПП}}(0) = 0$; $\lim_{P \rightarrow 1} C_{\text{ПП}}(P) = \infty$.

Пусть общее количество сбрасываемых ЗВ (до очистки) зависит от количества произведенной на ПП продукции линейно с постоянным коэффициентом β , т. е.

$$W = \beta R(\Phi). \quad (7)$$

Производственная функция ПП берется в виде

$$R(\Phi) = \theta \Phi^\eta; \quad \eta, \theta = \text{const}; \quad 0 < \eta < 1. \quad (8)$$

Задачи (1)—(8) решаются при следующих ограничениях на управления

$$q \leq P \leq 1 - \varepsilon, \quad (9)$$

$$\gamma \leq H \leq 1, \quad (10)$$

$$0 \leq q \leq 1 - \varepsilon; \quad 0 \leq T \leq T_{\max}, \quad (11)$$

где T_{\max} , ε и γ — заданные постоянные; величина ε зависит от технологических возможностей очистки сточных вод на ПП; γ определяет минимальную долю средств, полученных с ПП и передаваемых ОУ; $0 < \varepsilon, \gamma < 1$.

Из выражений (1)—(3) следует, что для поддержания УС в гомеостазе достаточно выполнения неравенства

$$p_+ \leq P \leq 1 - \varepsilon, \quad (12)$$

где $p_+ = \max(1 - Q_{\max} Q^0/W; 1 - (B_{\max} - B_0)/(kW))$. Далее считаем, что $p_+ \geq 0$.

При отсутствии коррупции в системе решается задача (4)—(12), представляющая собой нелинейную стационарную задачу оптимизации при наличии фазовых ограничений, исследуемую с учетом иерархии в отношениях между субъектами управления.

Для примера приведем алгоритм исследования модели (1)—(12) в случае побуждения, который состоит в следующем.

1. В результате максимизации прибыли (6), (9) с учетом допущений (7) и (8) определяются оптимальные стратегии ПП в зависимости от управлений ОУ — $P^*(T, q)$.

2. Найденные в п. 1 оптимальные стратегии ПП подставляются в целевую функцию (5), проводится ее максимизация по T при ограничении (11) и фиксированном q . В результате определяются оптимальные управления ОУ в зависимости от стратегии ФЦ $T^*(H)$.

3. Максимизируется целевая функция (4) при $P = P^*(T^*(H), q)$, $T = T^*(H)$, с учетом ограничения (10) и условия (12). Оптимальным для ФЦ является значение H^* , приносящее ему максимальный доход при выполненном условии (12).

4. Равновесие системы при побуждении определим как набор величин $\{H^*, T^*, P^*\}$, где $T^* = T^*(H^*)$, $P^* = P^*(q, T^*)$.

Равновесие модели (1)—(12) в общем случае достигается путем имитационного моделирования [16].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРУПЦИИ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД

Интересы ФЦ и ОУ в модели (4)—(12) различны, поэтому ОУ могут быть заинтересованы в получении взяток. Различаются два вида коррупции: административная и экономическая. В случае экономической коррупции ОУ в обмен на взятки занижают размер платы за сброс загрязнений в водоток, при административной — занижают минимально допустимые степени очистки сточных вод на ПП. Для ОУ взятки рассматриваются как один из факторов, наряду с доходами от платы за загрязнение, в общем балансе их интересов. Федеральный центр должен создать условия, при которых поддержание системы в гомеостазе в условиях коррупции будет экономически выгодно для ОУ. Однако добиться этого ФЦ удастся не всегда.

Федеральный центр контролирует деятельность ОУ и ПП, наказывая их за взятки штрафами. Размер штрафа зависит от «масштабных» коэффициентов [16], устанавливаемых ФЦ. Если масштабные коэффициенты велики, т. е. велика вероятность обнаружения взятки и степень наказания за нее, то экономический смысл дачи и получения взятки стремится к нулю. Масштабные коэффициенты определяются в ходе проверок, контроля ОУ и ПП. С ростом масштабных коэффициентов увеличиваются затраты со стороны ФЦ на контроль.

2.1. Экономическая коррупция

Экономическая коррупция имеет место в том случае, когда ОУ использует в качестве метода иерархического управления по отношению к ПП метод побуждения.

Целевые функции субъектов управления — ФЦ, ОУ и ПП — в этом случае соответственно примут вид:

$$J_0 = (1 - P)W[F(T^0)(1 - H) - h(L) + L\delta(\alpha_1(b) + \alpha_2(b))] - C_\Phi(y) \rightarrow \max_{H, L}; \quad (13)$$

$$J_y = (1 - P)W[F(T^0)H - L\delta\alpha_2(b) + \delta b] - C_0(y) \rightarrow \max_{T, \delta}; \quad (14)$$

$$J_{\text{ПП}} = zR(\Phi) - (1 - P)W[F(T^0) + L\delta\alpha_1(b) + \delta b] - WC_{\text{ПП}}(P) \rightarrow \max_{P, b}. \quad (15)$$



Здесь $F(T^0)$ — функция платы за единицу сброшенных ЗВ в условиях коррупции;

$$T^0 = \begin{cases} T + S - \delta a(b), & \text{если } T + S - \delta a(b) \geq 0, \\ 0, & \text{если } T + S - \delta a(b) < 0, \end{cases}$$

δ — коэффициент, равный нулю, если взятка не была принята, и единице в противном случае; b — размер взятки; $a(b)$ — функция «эффективности» взятки, характеризующая, насколько взятка уменьшает размер платы за сброс загрязнений; $\alpha_1(b)$, $\alpha_2(b)$ — функции штрафа ОУ и ПП за взятку; L — «масштабный» коэффициент, который позволяет варьировать размер наказания за взятку; $h(L)$ — функции затрат ФЦ на определение «масштабного» коэффициента, отнесенные к единице сброшенных ЗВ; $S \geq 0$ — постоянная величина; если $S = 0$, то имеет место попустительство, в противном случае — вымогательство. При попустительстве базовый набор услуг гарантируется, а дополнительные послабления предоставляются в обмен на взятку. При вымогательстве взятка требуется уже для предоставления базового уровня услуг. Функции $a(b)$, $\alpha_1(b)$ и $\alpha_2(b)$, $h(L)$ — возрастающие функции своих аргументов, причем $a(0) = \alpha_1(0) = \alpha_2(0) = h(0) = 0$.

Максимум целевых функций (13)–(15) ищется сразу по двум переменным: (13) — по H и L ; (14) — по T и δ ; (15) — по P и b .

Задачи (13)–(15) решаются при следующих ограничениях на управления

$$0 \leq P \leq 1 - \varepsilon, \quad 0 \leq b \leq b_{\max}, \quad (16)$$

$$\gamma \leq H \leq 1, \quad 0 \leq L \leq L_{\max}, \quad (17)$$

$$\delta = \begin{cases} 0, & 0 \leq T \leq T_{\max}, \\ 1, & \end{cases} \quad (18)$$

где b_{\max} и L_{\max} — заданные постоянные величины.

В случае экономической коррупции решается задача (7), (8), (12)–(18).

Алгоритм построения решения состоит в следующем.

1. В результате максимизации целевой функции (15) при ограничениях (16) по переменным P и b определяются оптимальные стратегии ПП в зависимости от управлений ОУ: $P^*(q, T, \delta)$, $b^*(q, T, \delta)$.

2. Найденные в п. 1 оптимальные стратегии ПП подставляются в целевую функцию (14), после максимизации которой по $\{T, \delta\}$ при ограничениях (18) и фиксированном значении q . В результате определяются оптимальные управления ОУ в зависимости от стратегии ФЦ $T^*(H, L)$, $\delta^*(H, L)$.

3. Максимизируется целевая функция (13) при $P = P^*(q, T^*, \delta^*)$, $b = b^*(q, T^*, \delta^*)$, $T = T^*(H, L)$, $\delta = \delta^*(H, L)$ и ограничениях (17) с учетом гомеос-

таза (12). Оптимальными для ФЦ являются значения H^* и L^* , приносящие ему максимальный доход при выполненных условиях (12).

4. Равновесие системы при экономической коррупции определим как набор величин $\{H^*, L^*, T^*, \delta^*, P^*, b^*\}$, где $T^* = T^*(H^*, L^*)$, $\delta^* = \delta^*(H^*, L^*)$, $P^* = P^*(q, T^*, \delta^*)$, $b^* = b^*(q, T^*, \delta^*)$.

Равновесие в общем случае строится путем имитационного моделирования [16].

2.2. Административная коррупция

Административная коррупция возникает, когда ОУ применяют в качестве метода иерархического управления по отношению к ПП метод принуждения.

Целевые функции субъектов управления — ФЦ, ОУ и ПП — примут соответственно вид:

$$J_0 = (1 - P)W[F(T)(1 - H) - h(L) + L\delta(\alpha_1(b) + \alpha_2(b))] - C_\Phi(y) \rightarrow \max_{H, L}; \quad (19)$$

$$J_y = (1 - P)W[F(T)H - L\delta\alpha_2(b) + \delta b] - C_0(y) \rightarrow \max_{q, \delta}; \quad (20)$$

$$J_{\text{ПП}} = zR(\Phi) - (1 - P)W[F(T) + L\delta\alpha_1(b) + \delta b] - WC_{\text{ПП}}(P) \rightarrow \max_{P, b}. \quad (21)$$

В этом случае целевая функция ОУ оптимизируется по переменным q и δ .

Ограничения на управления (16), (18) принимают вид

$$q^0(q, b) \leq P \leq 1 - \varepsilon; \quad 0 \leq b \leq b_{\max}; \quad (22)$$

$$\delta = \begin{cases} 0, & 0 \leq q \leq 1 - \varepsilon. \\ 1, & \end{cases} \quad (23)$$

Ограничение (17) останется без изменений.

Функция $q^0(q, b)$ описывает взяточничество. Она характеризует, насколько взятка снижает минимально допустимые степени очистки сточных вод на ПП. Эта функция обладает следующими свойствами: не убывает на отрезке $[0, 1 - \varepsilon]$ по q и не возрастает на отрезке $[0, b_{\max}]$ по b . В случае принуждения ОУ за взятку занижают минимально допустимую степень q очистки сточных вод на ПП. Такой вид коррупции может нанести ущерб окружающей среде, если ОУ за взятки готовы нарушить гомеостаз системы.

Будем говорить, что имеет место попустительство, если $q^0(q, b) = q$, и вымогательство, если $q^0(q, b) > q$. Случай $q^0(q, b) < q$ (фактическое отсутствие законодательного регулирования) не рассматривается.

В случае попустительства функция q^0 при невозможности нарушения гомеостаза может быть взята в виде

$$q^0(q, b) = q(1 - b/b_{\max}) + p_+ b/b_{\max}, \quad (24)$$

где величина p_+ гарантирует поддержание системы в гомеостазе. В этом случае $q^0(q, b) = q$; $q^0(q, b_{\max}) = p_+$.

Если за взятки ОУ готовы нарушить гомеостаз системы, то

$$\begin{aligned} q^0(q, b) &= q(1 - b/b_{\max}), \quad q^0(q, 0) = q; \\ q^0(q, b_{\max}) &= 0. \end{aligned} \quad (25)$$

При вымогательстве

$$\begin{aligned} q^0(q, b) &= qb/b_{\max} + (b_{\max} - b)(1 - \varepsilon)/b_{\max}, \\ q^0(q, 0) &= 1 - \varepsilon; \quad q^0(q, b_{\max}) = q, \end{aligned} \quad (26)$$

и коррупция не мешает поддержанию системы в гомеостазе.

В случае административной коррупции система описывается системой соотношений (7), (8), (12), (17), (19)—(26). Далее исследуется случай (24). Выбор этой функции взятки означает: ОУ уверены, что при нарушении состояния гомеостаза ФЦ ужесточит контроль над ним и велика вероятность значительного наказания за принятую взятку. Поэтому ОУ при принятии взятки стремится поддерживать систему в гомеостазе.

Алгоритм построения равновесия при административной коррупции аналогичен алгоритму при экономической коррупции, описанному в п. 2.1.

3. ПРИМЕРЫ

Исследование модели, после перехода в оптимизационных задачах от ограничений типа неравенств к ограничениям типа равенств, проводится методом множителей Лагранжа.

Пример 1. Пусть при экономической коррупции в модели (7), (8), (12)—(18) входные функции имеют вид

$$\begin{aligned} a(b) &= A_1 b, \quad \alpha_1(x) = \vartheta_1 x, \quad \alpha_2(x) = \vartheta_2 x, \quad h(L) = kL, \\ C_0(y) &= C_0 y, \quad C_\phi(y) = C_\phi y, \end{aligned} \quad (27)$$

$C_{\text{ПП}}(P) = DP/(1 - P)$, C_0 , C_ϕ , A_1 , ϑ_1 , ϑ_2 , k , $D = \text{const}$, кроме того, $F(T) = T$.

Оптимальные стратегии различных субъектов управления обозначим δ^* , T^* , b^* , P^* , L^* и H^* .

Если $A_1 - 1 - \vartheta_1 L^* > 0$, то взятка, с точки зрения ПП, является «эффективной», ее размер максимален: $b^* = b_{\max}$.

В противном случае взятка не предлагается: $b^* = 0$.

Для ОУ при любых входных данных $T^* = T_{\max}$.

Обозначим $p^0(b, L) = 1 - \sqrt{\frac{D}{T_{\max} + S - b(A_1 - 1 - \vartheta_1 L)}}$.

$$\text{Тогда } P^*(b, L) = \begin{cases} 0, & \text{если } p^0(b, L) < 0, \\ p^0(b, L), & \text{если } 0 \leq p^0(b, L) \leq 1 - \varepsilon, \\ 1 - \varepsilon, & \text{если } p^0(b, L) > 1 - \varepsilon. \end{cases}$$

Из последней формулы видно, что экономическая коррупция уменьшает оптимальную для ПП степень очистки сточных вод.

Дальнейшее рассмотрение для простоты проведем в случае, когда

$$\begin{aligned} \gamma A_1 &< 1; \\ \varepsilon^2(T_{\max} + S - b_{\max}(A_1 - 1 - \vartheta_1 L_{\max})) &< D < (T_{\max} + \\ &+ S - b_{\max}(A_1 - 1)). \end{aligned} \quad (28)$$

Первое из неравенств (28) делает для ОУ выгодным принятие взятки при отсутствии контроля ($L = 0$), из второго следует, что $P^* = p^0(b, L)$.

Тогда, если $p^0(0, 0) < p_+$, то поддерживать систему в гомеостазе не удастся даже при отсутствии коррупции. У ФЦ недостаточно для этого экономических возможностей воздействия на ОУ, у ОУ — на ПП. Метод побуждения не работает.

В случае, когда не предусмотрено наказание за взятку, т. е. $k = \vartheta_1 = \vartheta_2 = 0$, получим, что при $H^* < 1/A_1$ ОУ взятку берут ($\delta^* = 1$). В противном случае взятка отклоняется ($\delta^* = 0$).

Таким образом, даже без административного контроля ОУ и ПП, федеральный центр может экономическими методами искоренить коррупцию в системе, а именно, создать условия, при которых ОУ будет невыгодно брать предлагаемые ему взятки. Коррупция не является характерной чертой иерархических систем управления.

Если $p^0(b_{\max}, 0) \geq p_+$, $A_1 > 1$ и

$$\begin{aligned} &((1 - \gamma)(T_{\max} + S - A_1 b_{\max}) - C_\phi) \times \\ &\times \sqrt{\frac{D}{T_{\max} + S - A_1 b_{\max} + b_{\max}}} > \sqrt{\frac{D}{T_{\max} + S}} ((T_{\max} + S) \times \\ &\times (1 - 1/A_1) - C_\phi), \end{aligned} \quad (29)$$

то для ФЦ экономически выгодна коррупция и

$$\begin{aligned} H^* &= \gamma, \quad T^* = T_{\max}, \quad \delta^* = 1, \quad b^* = b_{\max}, \\ P^* &= p^0(b_{\max}, 0). \end{aligned} \quad (30)$$

Если $p^0(b_{\max}, 0) \geq p_+$, $A_1 > 1$, но условие (29) не выполнено, то ФЦ экономически не заинтересован в наличии коррупции в системе управления. Поэтому часть средств, получаемых от ПП, он отдает ОУ, которому становится невыгодно брать предлагаемые взятки. Тогда

$$\begin{aligned} H^* &= 1 - 1/A_1, \quad T^* = T_{\max}, \quad \delta^* = 0, \quad b^* = 0, \\ P^* &= p^0(0, 0). \end{aligned} \quad (31)$$

В случае, когда $A_1 > 1$ и $p^0(b_{\max}, 0) < p_+ \leq p^0(0, 0)$, система будет в гомеостазе только при отсутствии коррупции, так как при коррупции уменьшается оптимальная для ПП степень очистки сточных вод. Федеральный центр не допускает коррупции в системе, и решение задается формулами (31).



Если $A_1 < 1$ и $p_+ \leq p^0(0, 0)$, то коррупции в системе нет, она поддерживается в гомеостазе, и

$$H^* = \gamma, \quad T^* = T_{\max}, \quad \delta^* = 0, \quad b^* = 0, \quad P^* = p^0(0, 0). \quad (32)$$

Метод побуждения в случае (30)–(32) в условиях коррупции реализуется, система поддерживается в гомеостазе.

Случай наказания за взятку ($k > 0, \vartheta_1 > 0, \vartheta_2 > 0$) рассмотрим при $A_1 > 1$, иначе решение задается формулами (32).

Если $(\vartheta_1 + \vartheta_2)b_{\max} < k$, то $L^* = 0$. Для ФЦ невыгоден контроль ОУ и ПП, и рассмотрение сводится к случаю отсутствия наказания за взятку. В противном случае коррупция экономически выгодна для ФЦ в рамках предложенной модели. Федеральный центр тратит собственные средства на контроль ОУ и ПП и может их вернуть только при наличии коррупции путем штрафа ОУ и ПП. Поэтому, если коррупция не мешает поддержанию системы в гомеостазе, то ФЦ стремится к ее наличию в системе.

Если $p^0(b_{\max}, L_{\max}) < p_+ \leq p^0(0, 0)$, то система будет в гомеостазе только при отсутствии коррупции. Тогда, если $1 - A_1 - \vartheta_2 L_{\max} \geq 0$, то коррупцию исключить не удастся, метод побуждения в условиях коррупции не работает, условия гомеостаза нарушаются. В противном случае при $p^0(b_{\max}, L_{\max}) < p_+ \leq p^0(0, 0)$ коррупция в системе отсутствует, и

$$L^* = L_{\max}, \quad H^* = \max(\gamma, 1 - \vartheta_2)L_{\max}/A_1, \quad T^* = T_{\max}, \\ \delta^* = 0, \quad b^* = 0, \quad P^* = p^0(0, 0).$$

Если $(\vartheta_1 + \vartheta_2)b_{\max} > k$ (контроль выгоден ФЦ) и $p^0(b_{\max}, L_1) > p_+$, где $0 \leq L_1 \leq L_{\max}$ (поддержание системы в гомеостазе возможно при коррупции), то

$$L^* = \max\left(0, \min\left(\frac{A_1 - 1}{\vartheta_1}; \frac{1 - \gamma A_1}{\vartheta_2}; \frac{(A_1 - 1)b_{\max} + D/(1 - p_+)^2 - T_{\max} - S}{\vartheta_1 b_{\max}}\right)\right),$$

$$H^* = \gamma, \quad T^* = T_{\max}, \quad \delta^* = 1, \quad b^* = b_{\max}, \quad P^* = p^0(b_{\max}, L^*).$$

В этом случае ФЦ выгодна максимальная степень контроля ОУ и ПП, при которой система находится в состоянии гомеостаза, а ОУ и ПП, несмотря на контроль со стороны ФЦ, остается выгодным предлагать и брать взятки.

Условие $L^* \leq (A_1 - 1)/\vartheta_1$ делает выгодным для ПП дачу взятки, условие $L^* \leq (1 - \gamma A_1)/\vartheta_2$ — принятие взятки

ОУ, а условие $L^* \leq \frac{(A_1 - 1)b_{\max} + D/(1 - p_+)^2 - T_{\max} - S}{\vartheta_1 b_{\max}}$

позволяет поддерживать систему в гомеостазе.

Таким образом, если ФЦ контролирует ОУ и ПП, то для него выгодна контролируемая коррупция в системе, если она не мешает поддержанию системы в гомеостазе.

Пример 2. Исследуем административную коррупцию (модель (7), (8), (12), (17), (19)–(23)) в случае (24) или (26) и входных функций (27).

Пусть $\varepsilon \ll 1$ и, как следствие, выполнены два неравенства

$$\varepsilon^2(T + b_{\max}) < D < T + b_{\max}; \\ -\varepsilon F(T) - D/(1 - \varepsilon) + 2\sqrt{D} \sqrt{F(T) + b_{\max}} + \\ + \sqrt{\frac{D}{F(T) + b_{\max}}} \vartheta_1 L_{\max} b_{\max} < 0. \quad (33)$$

Условия (33) делают для ПП невыгодной стратегию ($b^* = 0, p^* = 1 - \varepsilon$) по сравнению со стратегией $\left(b^* = b_{\max}, p^* = 1 - \sqrt{\frac{D}{F(T) + b_{\max} + \vartheta_1 L_{\max} b_{\max}}}\right)$, если обе принадлежат множеству допустимых управлений.

Пусть, кроме того,

$$F(T)\gamma - C_0 > 0, \quad F(T)(1 - \gamma) - C_\Phi > 0. \quad (34)$$

Неравенства (34) показывают, что ФЦ и ОУ на проведение очистных мероприятий выделяют средства, полученные от ПП в виде платы за сброс загрязнений.

Если $k > (\vartheta_1 + \vartheta_2)b$, то контроль за ОУ и ПП для ФЦ экономически невыгоден, поэтому $L^* = 0$. В противном случае ФЦ нужна контролируемая коррупция в системе, и $L^* = 1/\vartheta_2$. Тогда для ОУ становится выгодным брать предлагаемые ПП взятки, система будет в гомеостазе в силу выбора функции (24). При $L^* = 1/\vartheta_2$ ОУ заставляет (!) ПП давать ему взятку, выбирая $q^* = 1 - \varepsilon$. Для ОУ в большинстве случаев выгодна минимально возможная степень очистки сточных вод на ПП, обеспечивающая поддержание системы в гомеостазе, т. е. выгодна стратегия ПП $p = p_+$. Но ОУ в полной мере использует свое положение в иерархии субъектов управления. Зная целевую функцию ПП и неравенство (33), они видят, что ПП будет выгодно дать ему взятку. Вопрос только в ее размере. Поэтому $q^* = 1 - \varepsilon$. Данное значение q для ОУ может не быть оптимальным при отсутствии взятки, но они выбирают это значение q , будучи уверенным в получении взятки. В результате, если $k < (\vartheta_1 + \vartheta_2)b$, то $H^* = \gamma, L^* = 1/\vartheta_2, q^* = 1 - \varepsilon, \delta^* = 1$.

Если $k > (\vartheta_1 + \vartheta_2)b$, то получим похожие стратегии $H^* = \gamma, L^* = 0, q^* = 1 - \varepsilon, \delta^* = 1$.

Для ПП и при попустительстве, и при вымогательстве оптимальной будет одна из следующих двух стратегий:

$$p_1 = \begin{cases} p_+, & \text{если } 1 - \sqrt{\frac{D}{F(T) + b_{\max} + \vartheta_1 L^* b_{\max}}} < p_+, \\ 1 - \sqrt{\frac{D}{F(T) + b_{\max} + \vartheta_1 L^* b_{\max}}}, & \\ \text{если } 1 - \sqrt{\frac{D}{F(T) + b_{\max} + \vartheta_1 L^* b_{\max}}} > p_+, \end{cases} \quad (35)$$

и $p_2 = p_+ b_2 / b_{\max} + (b_{\max} - b_2)(1 - \varepsilon) / b_{\max}$, если $0 \leq b_2 \leq b_{\max}$, где b_2 есть корни уравнения

$$\begin{aligned} & -(1 - (p_+ b_2 / b_{\max} + (b_{\max} - b_2)(1 - \varepsilon) / b_{\max})) + \\ & + (F(T) + b_2)(p_+ / b_{\max} - (1 - \varepsilon) / b_{\max}) - \\ & - D(p_+ / b_{\max} - (1 - \varepsilon) / b_{\max}) \times \\ & \times \frac{1}{(1 - (p_+ b_2 / b_{\max} + (b_{\max} - b_2)(1 - \varepsilon) / b_{\max}))^2} = 0. \end{aligned} \quad (36)$$

Если $b_2 \notin [0, b_{\max}]$, то оптимальна стратегия (35). Уравнение (36) решается, например, методом Ньютона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных моделей экономической и административной коррупции позволил сделать следующие выводы.

- Во всех рассмотренных случаях в рамках предложенной модели федеральному центру безразлично, имеется ли коррупция в системе, если она не затрагивает его экономических интересов и не мешает поддержанию системы в гомеостазе.
- Влияние коррупции на управляемую систему неоднозначно. Экономическая коррупция может препятствовать поддержанию системы в гомеостазе, так как уменьшает оптимальную для промышленных предприятий степень очистки сточных вод. Если коррупция выводит систему из гомеостаза, то федеральный центр борется с коррупцией, независимо от своих экономических интересов. Административная коррупция, наоборот, способствует гомеостазу, если органы управления, принимая взятку, стремятся избежать наказания за нее и поддерживают систему в гомеостазе.
- При контроле органов управления и предприятий для федерального центра всегда экономически выгодна контролируемая коррупция в системе, если она не мешает состоянию гомеостаза. Оптимальной для федерального центра является максимальная степень контроля, при которой для предприятий и органов управления выгодна коррупция.
- При административной коррупции промышленные предприятия в силу своего положения в иерархии, вынуждены всегда давать взятки органам управления, если они их берут.
- При достаточных возможностях федерального центра борьба с коррупцией возможна как административными (контроль), так и экономическими (увеличением доли средств предприятий, поступающей к органам управления, степени контроля предприятий и органов управления) методами.

- При административной коррупции нет принципиальной разницы между вымогательством и попустительством.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rose-Ackerman S.* The Economics of Corruption // Journal of Political Economy. — 1975. — N 4. — P. 187–203.
2. *Shleifer A., Vishny R.W.* Corruption // The Quarterly Journal of Economics. — 1993. — Vol. 107, N 33. — P. 599–617.
3. *Mookherjee D., Png I.P.* Corruptible Law Enforcers; How Should They Be Compensated // Economic Journal. — 1995. — N 105. — P. 112–121.
4. *Lambert-Mogiliansky A., Majumdar M., Radner R.* Petty corruption: A game theoretical approach // Journal of Economic Theory. — 2008. — Vol. 4. — P. 273–297.
5. *Chander P., Wilde L.* Corruption in Tax Administration // Journal of Political Economy. — 1992. — Vol. 49. — N 2. — P. 333–349.
6. *Beensstock M.* Corruption and Development // World Development. — 1979. — Vol. 7. — P. 82–91.
7. *Bac M.* Corruption and supervision costs in hierarchies // Journal of Comparative Economics. — 1996. — N 2. — P. 99–118.
8. *Hindriks J., Keen M., Muthoo A.* Corruption, Extortion and Evasion // Journal of Public Economics. — 1999. — Vol. 74, N 3. — P. 395–430.
9. *Bardhan P.* Corruption and development: a review of issues // Journal of Economic Literature. — 1997. — Vol. 35, N 3. — P. 1320–1346.
10. *Левин М.И., Цирик М.Л.* Коррупция как объект математического моделирования // Экономика и математические методы. — 1998. — Т. 34, № 3. — С. 40–62.
11. *Полтерович В.М.* Факторы коррупции // Экономика и математические методы. — 1998. — Т. 34, вып. 3. — С. 30–39.
12. *Выборнов Р.А.* Модели и методы управления организационными системами с коррупционным поведением участников. — М.: ИПУ РАН, 2006. — 110 с.
13. *Marjit S., Shi H.* On controlling crime with corrupt officials // Journal of Economic Behavior and Organization. — 1996. — Vol. 34. — P. 163–172.
14. *Угольницкий Г.А., Усов А.Б.* Управление устойчивым развитием иерархических систем в условиях коррупции // Проблемы управления. — 2010. — № 6. — С. 19–26.
15. *Угольницкий Г.А.* Иерархическое управление устойчивым развитием. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2010. — 336 с.
16. *Угольницкий Г.А., Усов А.Б.* Трехуровневые системы управления эколого-экономическими объектами веерной структуры // Проблемы управления. — 2010. — № 1. — С. 26–32.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Угольницкий Геннадий Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой, ☎ (863) 297-51-14, ✉ ougoln@mail.ru,

Усов Анатолий Борисович — д-р техн. наук, профессор, ✉ usov@math.rsu.ru,

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону.

РАСШИРЕННЫЕ БЛОК-СХЕМЫ ДЛЯ ИДЕАЛЬНЫХ СИСТЕМНЫХ СЕТЕЙ

М.Ф. Каравай, В.С. Подлазов

Рассмотрен метод построения 1-расширенных блок-схем, являющихся обобщением изучаемых в комбинаторике симметричных блок-схем. Дано определение 1-расширенных блок-схем, указан алгоритм их построения и рассмотрен способ их применения для построения распределенных полных коммутаторов как «идеальных» системных сетей для многопроцессорных вычислительных систем.

Ключевые слова: многопроцессорная вычислительная система, идеальная системная сеть, распределенный полный коммутатор, неблокируемая сеть, бесконфликтная самомаршрутизация, произвольная перестановка пакетов данных, симметричная блок-схема.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время за сетями связи многопроцессорных вычислительных систем утвердился термин системные сети. Идеальной системной сетью (СС) [1] считается та, которая обеспечивает прямые каналные соединения (без промежуточной буферизации данных) для любой пары абонентов сети при параллельной передаче от всех абонентов. Поэтому, например, идеальной является СС, которая имеет структуру полного графа или состоит из одной СБИС полного коммутатора. Обе эти структуры непригодны для создания идеальных СС с большим числом абонентов — первая вследствие большого числа портов абонентов и каналов между ними, а вторая из-за невозможности создания коммутаторных СБИС с необходимым числом портов.

Идеальная СС позволяет бесконфликтно осуществлять произвольную перестановку пакетов данных по прямым каналам между абонентами посредством их независимой самомаршрутизации каждым абонентом. Это маршрутное свойство идеальной СС называется неблокируемостью и самомаршрутизируемостью.

В работах [2—4] был предложен метод расширения любой СС с сохранением свойств маршрутизации. Он основывается на описании СС в терминах неполных уравновешенных блок-схем, давно уже исследуемых в комбинаторике [5]. Если в

качестве исходной СС берется полный коммутатор, то расширенная СС является неблокируемым и самомаршрутизируемым распределенным полным коммутатором, т. е. представляет собой идеальную системную сеть. Данный метод расширения имеет возможность каскадного применения, что позволяет строить идеальные СС на любое число абонентов [4].

Неполной уравновешенной блок-схемой $B(N, M, m, k, \sigma)$ называется набор из M блоков, в которые входят N элементов так, что в каждый блок входит k разных элементов, каждый элемент входит в m блоков, а каждая пара элементов входит в σ блоков.

Отметим, что для блок-схемы $B(N, M, k, m, \sigma)$ не определен порядок размещения блоков, элементов в них и порядок нумерации элементов. Таким образом, произвольная перестановка блоков и элементов в блоках, а также перенумерация элементов являются тождественными преобразованиями, которые не меняют блок-схему с точностью до изоморфизма.

Приведенное определение блок-схемы связывает ее параметры следующими соотношениями: $Nm = kM$ и $N = m(k - 1)/\sigma + 1$. Минимальное число блоков M и максимальное число элементов N обеспечиваются в случае симметричных блок-схем, когда $k = m$ и $M = N = m(m - 1)/\sigma + 1$. Такие симметричные блок-схемы $B(N, m, \sigma)$ и рассматриваются в дальнейшем.

Теперь в определении симметричной блок-схемы заменим блок на некоторую исходную СС с m портами — ИсхС(m), элемент — на абонента с m портами, вхождение элемента в блок — на дуплексное подсоединение абонента к одной из ИсхС(m) и, наконец, симметричную блок-схему — на расширенную СС с N абонентами. Тогда последняя состоит из N копий ИсхС(m), к каждой копии подсоединено m разных абонентов, каждый абонент подсоединен к m копиям ИсхС(m), а между каждой парой абонентов имеется σ параллельных каналов, которые проходят через разные ИсхС(m). При этом каждый канал *последовательно* проходит только через одну ИсхС(m). Поэтому расширенная сеть наследует маршрутные свойства ИсхС(m), и добавляется σ -кратное резервирование каналов. Такая расширенная сеть называется простейшей СС — ПРС(N, m, σ). Очевидно, что ПРС(N, m, σ) изоморфна блок-схема $B(N, m, \sigma)$. Если ИсхС(m) задается полным коммутатором $m \times m$, то ПРС(N, m, σ) является идеальной СС с резервными каналами.

Структура ПРС(N, m, σ) имеет вид симметричного двудольного графа, в котором число узлов в каждой доле равно N , а степень любого узла в каждой доле равна m (рис. 1). Узлами одной доли являются ИсхС(m), а узлами другой доли — m -портовые абоненты. Между любыми двумя узлами в каждой доле существует ровно σ разных путей длины 2, проходящих через разные узлы в другой доле. Такой граф мы называем минимальным квазиполным графом [6, 7].

Если ИсхС(m) задается полным коммутатором $m \times m$, то ПРС(N, m, σ) можно представить как распределенный полный коммутатор $N \times N$. Что для этого нужно? Достаточно представить m -многопортового абонента (рис. 2) как связку 1-портового абонента и разветвителя/объединителя дуплексных каналов $(1 \times m)/(m \times 1)$ — РОК m .

Теперь схему ПРС(N, m, σ) (см. рис. 1) можно преобразовать в схему СС с двумя коммутирующими каскадами — хребта коммутаторов $m \times m$ и кас-

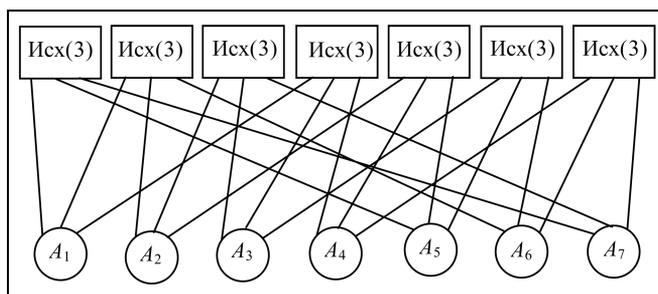


Рис. 1. Структура ПРС(7, 3, 1) в виде минимального квазиполного графа

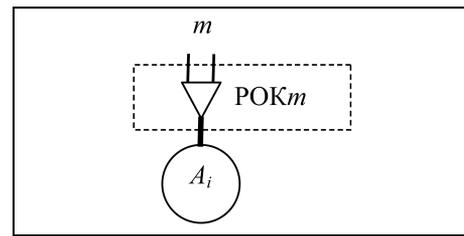


Рис. 2. Разветвитель/объединитель m дуплексных каналов РОК m

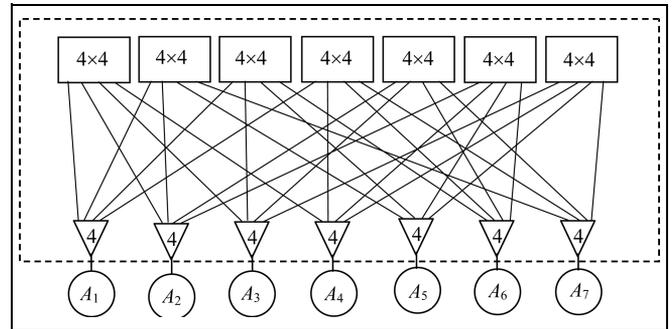


Рис. 3. Распределенный полный коммутатор 7×7 — РК $_1(7, 4, 2)$

када РОК m . Пример такой схемы при $m = 3$ приведен на рис. 3. Часть такой схемы СС, располагающаяся выше интерфейса абонент — РОК m и заключенная в штриховой прямоугольник, представляет собой полный распределенный коммутатор с N дуплексными портами, который является однокаскадным распределенным коммутатором РК $_1(N, m, \sigma)$.

Если взять распределенный коммутатор РК $_1(N, m, \sigma)$ в качестве ИсхС(N), то с использованием ПРС(N, m, σ) и РОК m можно построить [4] двухкаскадный распределенный полный коммутатор $R_2 \times R_2$, в котором $N \lfloor N/m \rfloor < R_2 < N \lceil N/m \rceil$. Итеративное повторение этой процедуры позволяет строить многокаскадные полные коммутаторы с резервными каналами на любое число портов. Эти коммутаторы сохраняют свойство неблокируемости и самомаршрутизируемости, т. е. остаются идеальными СС.

Для симметричных блок-схем $B(N, m, \sigma)$ имеется проблема существования и построения. Блок-схемы $B(N, m, \sigma)$ существуют не для всех значений параметров m и σ . Очевидно, что они не существуют для тех значений m и σ , которые задают нецелые N . Для целых N известны только необходимые условия существования блок-схем $B(N, m, \sigma)$ — теорема БРЧ (Брук, Райзер, Човла) [5]. Но если



Таблица 1

Параметры симметричных блок-схем $B(N, m, \sigma)$

$B(N, m, 1)$											
m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	3	7	13	21	31	43	57	73	91	111	133
$B(N, m, 2)$											
m	—	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	—	4	7	11	16	22	29	37	46	56	67
$B(N, m, 3)$											
m	—	—	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	—	—	5	—	11	15	—	25	31	—	45
$B(N, m, 4)$											
m	—	—	—	5	6	7	8	9	10	11	12
N	—	—	—	6	—	—	15	19	—	—	34

даже теорема БРЧ не запрещает существование блок-схемы $B(N, m, \sigma)$, то регулярные методы построения известны только для блок-схем, которые представимы в циклической форме [6, 7]. Не все возможные и существующие блок-схемы представимы в такой форме.

В табл. 1 кратко приведены параметры возможных симметричных блок-схем. Блок-схемы, которые не существуют (нецелое N), не имеют значений N ; построенные циклические блок-схемы не имеют заливок; блок-схемы, которые запрещены теоремой БРЧ, выделены светлой заливкой; ациклические блок-схемы, которые уже построены, выделены косой штриховкой; ациклические блок-схемы, которые еще не построены, выделены темной заливкой.

В данной работе ставится задача расширить определение симметричной блок-схемы так, чтобы «расширенная блок-схема» могла существовать для любых значений параметров m и σ , могла быть построена в циклической форме и, самое главное, могла быть использована для построения идеальных СС с резервными каналами, возможно с некоторыми накладными расходами.

1. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ БЛОК-СХЕМ В ЦИКЛИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

Симметричные блок-схемы явно задаются [2–5] таблицей, состоящей из N строк и $m + 1$ столбцов (см. примеры в табл. 2 и 3). Первый столбец таблицы блок-схемы $B(N, m, \sigma)$ содержит номера блоков, занумерованных от 1 до N . Элементы также нумеруются с 1 до N . В ячейках i -й строки осталь-

ных столбцов содержатся номера элементов, входящих в i -й блок.

Симметричная блок-схема имеет две формы канонического представления — циклическую и ациклическую. Ациклическая форма более общая — некоторые блок-схемы могут существовать в ациклической форме, но не могут быть представлены в циклической. Любая циклическая блок-схема может быть тождественными преобразованиями превращена в ациклическую, но не наоборот.

Циклическая блок-схема имеет форму представления, в которой столбцы таблицы содержат сдвинутые по строкам циклические последовательности номеров элементов 1, 2, ..., N . Будем характеризовать такую блок-схему набором номеров блоков (строк), в которые входит 1-й элемент. Обозначим этот набор как Σ . Циклическая блок-схема существует не для любого набора Σ — его еще надо найти. Построение циклической блок-схемы и сводится к нахождению набора Σ .

В ациклической блок-схеме всегда можно выделить две меньших несимметричных блок-схемы — производную $B'(m, N - 1, \sigma, m - 1, \sigma - 1)$ и остаточную $B''(N - m, N - 1, m - \sigma, m, \sigma)$. Производные блок-схемы в табл. 2 и 3 выделены жирным шрифтом, а остаточные — заливкой.

Таблица 2

Блок-схема $B(7, 3, 1)$ в двух формах представления

Циклическая блок-схема, $\Sigma = (1, 2, 4)$				Ациклическая блок-схема			
Блоки	Элементы			Блоки	Элементы		
1	1	7	5	1	1	2	3
2	2	1	6	2	1	4	6
3	3	2	7	3	1	5	7
4	4	3	1	4	2	4	5
5	5	4	2	5	2	6	7
6	6	5	3	6	3	4	7
7	7	6	4	7	3	5	6

Таблица 3

Блок-схема $B(7, 4, 2)$ в двух формах представления

Циклическая блок-схема, $\Sigma = (1, 2, 3, 5)$					Ациклическая блок-схема				
Блоки	Элементы				Блоки	Элементы			
1	1	7	6	4	1	1	2	3	4
2	2	1	7	5	2	1	2	5	7
3	3	2	1	6	3	1	3	5	6
4	4	3	2	7	4	1	4	6	7
5	5	4	3	1	5	2	3	6	7
6	6	5	4	2	6	2	4	5	6
7	7	6	5	3	7	3	4	5	7

Для циклических блок-схем при $\sigma = 1$ существует и достаточное условие их существования [5] — оно сводится к выполнению условия $m = p^r + 1$, где p — простое число и r — натуральное число.

Симметричные блок-схемы $B(N, m, \sigma)$ ищутся в виде матриц D размерности $N \times m$, строки которых задают блоки с размещенными в них элементами. Алгоритм построения матриц-решений D состоит в переборе всех вариантов размещения циклических последовательностей $1, 2, \dots, N$ в столбцах матрицы с отбором тех вариантов, для которых матрица D задает циклическую блок-схему. Обозначим a_i номер строки, в которой находится 1 в i -м столбце, считая $a_1 = 1$ и $a_i > a_{i+1}$. Обозначим Σ набор чисел (a_2, \dots, a_m) . Поиск решения сводится к построению всех наборов Σ , при которых матрицы D задают циклическую блок-схему [6, 7]. Алгоритм построения циклических блок-схем в дальнейшем именуется Σ -алгоритмом.

Критерием построения в матрице D циклической блок-схемы служит вид матрицы смежности C элементов блок-схемы, которая имеет размерность $N \times N$. В ПРС(N, m, σ) матрица смежности задает число разных путей между любой парой абонентов сети. Матрицу-решение D определяет матрица смежности C , которая содержит значение σ во всех ячейках, кроме ячеек главной диагонали, которая состоит из нулей.

При $\sigma = 1$ получение всех решений требует перебора C_{N-1}^{m-1} вариантов размещения всех чисел a_i в Σ . Используя формулу Стирлинга и учитывая, что $\lim_{N \rightarrow \infty} (N/m) = m$, можно показать, что

$$\lim_{N \rightarrow \infty} C_{N-1}^{m-1} = m^{m-1,5} e^{m-1} / \sqrt{2\pi}. \text{ Проверка вида}$$

матрицы смежности требует $O(m^4)$ операций сравнения. Поэтому Σ -алгоритм имеет сложность $O(m^{m+2,5} e^{m-1})$ и является NP -сложным по m , а не по N . При $\sigma > 1$ он оказывается NP -сложным по m/σ .

Σ -алгоритм позволяет найти все решения, среди которых много автоморфных. Автоморфизмом является циклический сдвиг столбцов, начиная со второго, матрицы D вправо на любое число позиций. Автоморфизмом является также зеркальное отражение матрицы D .

Σ -алгоритм для невозможных, запрещенных и ациклических блок-схем не находит решений.

2. ОДНОРАСШИРЕННАЯ БЛОК-СХЕМА

Назовем однорасширенной (далее 1-расширенной) блок-схемой $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ совокупность из N^* блоков, в которые входят N^* разных элементов так, что в каждый блок входит m разных эле-

ментов, каждый элемент входит в m блоков, а каждая пара элементов входит в σ или в $\sigma + 1$ блоков, и значение $N^* < N = m(m-1)/\sigma + 1$ является максимально возможным.

Однорасширенная блок-схема $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ строится в циклической форме с использованием Σ -алгоритма. Она строится в виде матрицы D^* размерности $N^* \times m$, строки которых задают блоки с размещенными в них элементами. Алгоритм построения матриц-решений D^* состоит в переборе всех вариантов размещения циклических последовательностей $1, 2, \dots, N^*$ в столбцах матрицы с отбором тех вариантов, для которых матрица D^* задает циклическую блок-схему. Критерием ее возникновения служит вид матрицы смежности C^* элементов размерности $N^* \times N^*$, которая содержит значения σ или $\sigma + 1$ во всех ячейках, кроме ячеек главной диагонали, которая состоит из нулей. В целях обеспечения однородности вхождения элементов дополнительно требуется, чтобы значения $\sigma + 1$ располагались только на диагоналях параллельных главной диагонали.

Поиск матриц-решений D^* начинается с $N^* = \lfloor N \rfloor$. Если решений нет, то он повторяется для $N^* = N^* - 1$ до тех пор, пока не найдется хотя бы одно решение.

Рассмотрим пример построения 1-расширенной блок-схемы. Блок-схема $B(N, 5, 3)$ не суще-

Таблица 4

Однорасширенная блок-схема $B^*(7, 5, 314)$

Блоки	Элементы				
1	1	7	6	5	4
2	2	1	7	6	5
3	3	2	1	7	6
4	4	3	2	1	7
5	5	4	3	2	1
6	6	5	4	3	2
7	7	6	5	4	3

Таблица 5

Матрица смежности для $B^*(7, 5, 314)$ в табличном виде

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0	4	3	3	3	3	4
2	4	0	4	3	3	3	3
3	3	4	0	4	3	3	3
4	3	3	4	0	4	3	3
5	3	3	3	4	0	4	3
6	3	3	3	3	4	0	4
7	4	3	3	3	3	4	0



ствуется, так как $N = 5 \cdot 4/3 + 1 = 7,66$ не является целым числом. Однако, удается найти несколько 1-расширенных блок-схем $B^*(7, 5, 3|4)$. Одна из них имеет Σ -набор (2, 3, 4, 5) и представлена в табл. 4. Матрица смежности для нее представлена в табл. 5. Она показывает, что некоторые пары элементов (i, j) входят в каждый блок четыре раза, для них $j = (i \pm 1) \bmod 7$, а остальные — 3 раза.

3. ЭМПИРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 1-РАСШИРЕННЫХ БЛОК-СХЕМ

Авторы провели ряд экспериментов по построению 1-расширенных блок-схем $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ для случаев, когда симметричная блок-схема $B(N, m, \sigma)$ не существует или еще не построена.

По теореме БРЧ блок-схема $B(43, 7, 1)$ не существует. Однако удалось построить несколько 1-расширенных блок-схем $B^*(39, 7, 1|2)$. Одна из них (первая построенная) имеет Σ -набор (2, 3, 5, 14, 19, 34). Матрица смежности C для блок-схемы $B^*(39, 7, 1|2)$ показывает, что некоторые пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 1) \bmod 39$ или $j = (i \pm 2) \bmod 39$, входят в каждый блок два раза, а остальные пары элементов — один раз.

Аналогично, по теореме БРЧ блок-схемы $B(22, 7, 2)$, $B(29, 8, 2)$ и $B(46, 10, 2)$ не существуют. С помощью Σ -алгоритма удалось построить 1-расширенные блок-схемы $B^*(21, 7, 2|3)$, $B^*(27, 8, 2|3)$ и $B^*(42, 10, 2|3)$ с Σ -наборами, в частности, (2, 3, 5, 9, 12, 17), (2, 3, 4, 7, 11, 17, 22) и (2, 3, 6, 9, 16, 19, 28, 37, 39) соответственно.

В блок-схеме $B^*(21, 7, 2|3)$ некоторые пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 7) \bmod 21$ и $j = (i \pm 14) \bmod 21$, входят в каждый блок три раза, а остальные пары — два раза. В блок-схеме $B^*(27, 8, 2|3)$ пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 1) \bmod 27$ и $j = (i \pm 7) \bmod 27$, входят в каждый блок три раза, а остальные пары — два раза. В блок-схеме $B^*(42, 10, 2|3)$ пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 3) \bmod 42$, $j = (i \pm 6) \bmod 42$, $j = (i \pm 7) \bmod 42$ и $j = (i \pm 9) \bmod 42$, входят в каждый блок три раза, а остальные пары — два раза.

Блок-схема $B(56, 11, 2)$ не существует в циклической форме, а в ациклической форме она еще не построена. С помощью Σ -алгоритма удалось построить, в частности, 1-расширенную блок-схему $B^*(51, 11, 2|3)$ с Σ -набором (2, 3, 4, 6, 15, 22, 30, 37, 43, 47). В ней пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 1) \bmod 51$, $j = (i \pm 2) \bmod 51$, $j = (i \pm 7) \bmod 51$, $j = (i \pm 10) \bmod 51$ и $j = (i \pm 15) \bmod 51$, входят в каждый блок три раза, а остальные пары — два раза.

Аналогично, блок-схема $B(45, 12, 3)$ не существует в циклической форме, а в ациклической

форме она еще не построена. С помощью расширенного Σ -алгоритма удалось построить, в частности, 1-расширенную блок-схему $B^*(43, 12, 3|4)$ с Σ -набором (2, 3, 4, 6, 11, 15, 18, 26, 28, 34, 40). В ней пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 2) \bmod 43$, $j = (i \pm 12) \bmod 43$ и $j = (i \pm 14) \bmod 43$, входят в каждый блок четыре раза, а остальные пары — три раза.

В множестве возможных блок-схем [3] имеется подмножество, в котором блок-схемы существуют при любых значениях параметров m и σ . Это подмножество с $m = \sigma$, $m = \sigma + 1$, $m = 2\sigma$ и $m = 2\sigma + 1$. В первых двух случаях блок-схемы существуют всегда в циклической форме, а во вторых двух случаях блок-схемы $B(27, 13, 6)$, $B(27, 14, 7)$, $B(39, 19, 9)$ и $B(39, 20, 10)$ в циклической форме не существуют. Тем не менее, удается построить 1-расширенные блок-схемы $B^*(26, 13, 6|7)$, $B^*(26, 14, 7|8)$, $B^*(38, 19, 9|10)$ и $B^*(38, 20, 10|11)$ в циклической форме. В частности, одна из $B^*(26, 13, 6|7)$ имеет Σ -набор (2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 14, 16, 18, 22, 23), и в ней пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 2) \bmod 26$, $j = (i \pm 5) \bmod 26$ и $j = (i \pm 12) \bmod 26$, входят в каждый блок семь раз, а остальные пары — шесть раз. Аналогично, одна из блок-схем $B^*(26, 14, 7|8)$ имеет Σ -набор (2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 14, 15, 19, 20, 25), и в ней пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 1) \bmod 26$, $j = (i \pm 3) \bmod 26$ и $j = (i \pm 9) \bmod 26$, входят в каждый блок восемь раз, а остальные пары — семь раз. Аналогично и для блок-схем $B^*(38, 19, 9|10)$ и $B^*(38, 20, 10|11)$, но с другими парами элементов (i, j) .

При $\sigma > 2$ число симметричных блок-схем $B(N, m, \sigma)$, которые не существуют по определению, так как N является дробным числом, больше числа возможных блок-схем [3]. Однако, даже в первом подмножестве удается построить 1-расширенные блок-схемы $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$. В качестве примера рассмотрим блок-схему $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ для $m = 8$ и $m = 11$. Удалось, в частности, построить блок-схему $B^*(19, 8, 3|4)$ и $B^*(36, 11, 3|4)$, с Σ -наборами (2, 3, 4, 6, 8, 12, 15) и (2, 3, 5, 7, 13, 14, 15, 20, 24, 34) соответственно. В блок-схеме $B^*(19, 8, 3|4)$ пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 2) \bmod 19$, входят в каждый блок четыре раза, а остальные пары — три раза. В блок-схеме $B^*(36, 11, 3|4)$ пары элементов (i, j) , для которых $j = (i \pm 1) \bmod 36$, $j = (i \pm 2) \bmod 36$ и $j = (i \pm 18) \bmod 36$, входят в каждый блок четыре раза, а остальные пары — три раза.

Подводя итог эксперимента, можно сказать, что 1-расширенные блок-схемы удалось построить для всех проверенных сочетаний m и σ . Во всех случаях оказалось, что N^* меньше N всего на несколько единиц — имеет место соотношение

Параметры блок-схем и 1-расширенных блок-схем

$B(N, m, 1) B^*(N^*, m, 1 2)$											
m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N N^*(\delta)$	3	7	13	21	31	43 39(4)	57	73	91	111 ?(?)	133
$B(N, m, 2) B^*(N^*, m, 2 3)$											
m	—	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N N^*(\delta)$	—	4	7	11	16 15(2)	22 21(4)	29 27(4)	37	46 42(8)	56 51(10)	67 63(8)
$B(N, m, 3) B^*(N^*, m, 3 4)$											
m	—	—	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N N^*(\delta)$	—	—	5	7(2)	11	15	19(1)	25 23(6)	31 29(6)	36(5)	45 43(6)
$B(N, m, 4) B^*(N^*, m, 4 5)$											
m	—	—	—	5	6	7	8	9	10	11	12
$N N^*(\delta)$	—	—	—	6	8(2)	11(2)	15	19	22(6)	27(6)	34 33(4)

$N^* \geq N - [m/2]$. Во всех случаях матрица смежности 1-расширенных блок-схем содержит значения $\sigma + 1$ только на парах симметричных диагоналей, число которых много меньше N^* . Теоретического обоснования данных свойств пока не проводилось, поэтому вопрос о существовании 1-расширенных блок-схем в общем случае остается открытым. Однако для практических целей построенных 1-расширенных блок-схем и полученных свойств вполне достаточно. Практические цели — это построение распределенных полных коммутаторов произвольного размера в фиксированном схемном базисе коммутаторов $m \times m$ и РОК m [8].

Результаты эксперимента, кратко представлены в табл. 6, которая построена добавлением в табл. 1 параметров 1-расширенных блок-схем для несуществующих и непостроенных блок-схем. Значение δ для 1-расширенных блок-схем задает число диагоналей со значением $\sigma + 1$ в матрице смежности. Результаты, отмеченные как «?», относятся к продолжающимся экспериментам, для выполнения которых потребовался многопроцессорный кластер (120 ядер — 15 восьмиядерных процессоров) и много времени выполнения (месяцы) даже на нем.

Значение δ задает, также, число элементов, с которыми каждый элемент образует пару в разных блоках $\sigma + 1$ раз. Поэтому необходимым условием существования 1-расширенных блок-схем является выполнение равенства $\delta = m(m - 1) - \sigma(N^* - 1)$. Оно следует из следующих соображений. Каждый элемент образует пару в каждом блоке с $(m - 1)$

элементами, а во всех блоках — с $m(m - 1)$ элементами. С другой стороны, каждый элемент образует σ пар с $\sigma(N^* - 1)$ элементами. Разница между этими выражениями и задает число $\sigma + 1$ пар.

4. ИДЕАЛЬНЫЕ СИСТЕМНЫЕ СЕТИ НА БАЗЕ 1-РАСШИРЕННЫХ БЛОК-СХЕМ

Однорасширенным блок-схемам можно дать ту же сетевую интерпретацию, что и симметричным блок-схемам. Заменяем в определении 1-расширенной блок-схемы блок на некоторую исходную СС с m портами — ИсхС(m), элемент — на абонента с m портами, вхождение элемента в блок — на дуплексное подсоединение абонента к одной из ИсхС(m) и, наконец, 1-расширенную блок-схему — на 1-расширенную СС с N^* абонентами. Тогда последняя состоит из N^* копий ИсхС(m), к каждой копии подсоединено m разных абонентов, каждый абонент подсоединен к m копиям ИсхС(m), а между каждой парой абонентов имеется σ или $\sigma + 1$ параллельных каналов, которые проходят через разные ИсхС(m). При этом каждый канал *последовательно* проходит только через одну ИсхС(m). Поэтому расширенная сеть наследует маршрутные свойства ИсхС(m). При этом добавляется как минимум σ -кратное резервирование каналов. Такая расширенная сеть называется простейшей 1-расширенной СС — ПРС*($N^*, m, \sigma|\sigma + 1$). Очевидно, что ПРС*($N^*, m, \sigma|\sigma + 1$) изоморфна блок-схема $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$. Если ИсхС(m) задается полным



коммутатором $m \times m$, то $\text{ПРС}^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ является идеальной СС с резервными каналами.

Заметим, что $\text{ПРС}^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ позволяет бесконфликтно реализовать произвольную перестановку пакетов данных между абонентами — путем самомаршрутизации каждого пакета его источником независимо от других источников. Для самомаршрутизации можно воспользоваться, например, червячной маршрутизацией [4]. Эта возможность сохраняется при отказе у каждого абонента любых $\sigma - 1$ каналов. Поэтому $\text{ПРС}^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ является $(\sigma - 1)$ -отказоустойчивой по каналам СС.

В условиях сохранения работоспособности у каждого абонента $\tau \leq \sigma$ каналов $\text{ПРС}^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ позволяет бесконфликтно реализовать также произвольную τ -перестановку пакетов данных между абонентами, т. е. одновременно реализовать τ разных перестановок.

Идеальная $\text{ПРС}^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$ благодаря использованию схем РОК m может быть преобразована в однокаскадный распределенный полный коммутатор $N^* \times N^* - \text{РК}_1(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$. Он, в свою очередь, может быть расширен в многокаскадный полный коммутатор с еще большим числом портов [4]. Любой такой коммутатор является неблокируемым и самомаршрутизируемым на произвольной перестановке пакетов данных и сохраняет σ -кратное резервирование каналов.

Таким образом, идеальная $\text{ПРС}^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$, изоморфная 1-расширенной блок-схеме $B^*(N^*, m, \sigma|\sigma + 1)$, уступает идеальной $\text{ПРС}(N, m, \sigma)$, изоморфной симметричной блок-схеме $B(N, m, \sigma)$, только из-за несколько меньшего числа абонентов: $N^* < N$. Однако для ее реализации требуется и меньшее число коммутаторов $m \times m$ и схем РОК m : $N^* < N$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе резко увеличена область применимости метода расширения произвольной системной сети с m абонентами до системной сети с $N^* > m$ абонентами, сохраняющего маршрутные свойства исходной сети и увеличивающий в $\sigma < m$ раз число каналов между любой парой абонентов и работающего, теперь, при любых значениях параметров σ и m . Если исходная сеть представляет собой полный коммутатор $m \times m$, то расширенная сеть образует распределенный полный коммутатор $N^* \times N^*$, являющийся неблокируемой самомаршрутизируемой сетью с прямыми каналами (без промежуточной буферизации) между абонентами — идеальной системной сетью, которая является так-

же $(\sigma - 1)$ -отказоустойчивой по каналам при бесконфликтной реализации произвольной перестановке пакетов данных между абонентами.

Метод основывается на использовании 1-расширенных симметричных блок-схем. Дано их определение, задан комбинаторный алгоритм их построения и экспериментально исследованы их свойства. Рассмотрена возможность построения простейших расширенных системных сетей, изоморфных 1-расширенным блок-схемам. Показано, что если эти сети строятся путем расширения полных коммутаторов, то они являются неблокируемыми распределенными полными коммутаторами, т. е. представляют собой идеальные системные сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar A., Peh L-S., Kundu P., Jha N.K. Toward ideal on-chip communication using express virtual channels // IEEE Micro. — 2008. — Jan/Feb. — P. 80—90.
2. Подлазов В.С., Соколов В.В. Метод однородного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем // Проблемы управления. — 2007. — № 2. — С. 22—27.
3. Николаев А.Б., Подлазов В.С. Отказоустойчивое расширение системных сетей многопроцессорных вычислительных систем // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 162—170.
4. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Распределенный полный коммутатор как «идеальная» системная сеть для многопроцессорных вычислительных систем // Управление большими системами. — 2011. — Вып. 34. — С. 92—116. URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS3405.pdf> (дата обращения 27.06.2012).
5. Холл М. Комбинаторика. — М.: Мир, 1970. — Гл. 10—12.
6. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С. Простые методы построения квазиполных графов (симметричных блок-схем) // Тр. IV междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2008, Москва, ИПУ РАН, октябрь 2008 г. — М.: 2008. — С. 232—249.
7. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С. Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 2. — С. 153—170.
8. Каравай М.Ф., Подлазов В.С., Соколов В.В. Метод расширения полных коммутаторов в фиксированном схемном базисе // Тр. 5-й междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО 2010, Москва, ИПУ РАН, октябрь 2010 г. — М., 2010. — С. 295—305. — URL: <http://raso.ipu.ru/pdf/A205.pdf> (дата обращения 28.06.2012).

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко.

Каравай Михаил Федорович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ☎ (495) 334-90-00, ✉ mkaravay@ipu.ru,

Подлазов Виктор Сергеевич — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-78-31, ✉ podlazov@ipu.ru,

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

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

О.В. Лукинова

Рассмотрены компьютерные методы формирования списка целей обеспечения безопасности проектируемой системы защиты автоматизированных бизнес-процессов компании, реализованных в виде информационной системы, которая представляется моделью OSE/RM.

Ключевые слова: комплексная система защиты, объект защиты, модель OSE/RM, бизнес-процесс, оценочные критерии безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование целей и стратегий их достижения — важная составляющая процедуры принятия решений при осуществлении тех или иных мероприятий. В данной статье речь пойдет о проектировании системы безопасности, позволяющей защитить корпоративную информационную систему (КИС) от нежелательных информационных воздействий.

Процесс построения системы защиты характеризуется слабоструктурированностью, противоречивостью требований, неоднозначностью оценки ситуаций, ошибками в выборе приоритетов, поэтому выбрать «правильные» цели и стратегии их достижения без компьютерной поддержки становится все сложнее. Преодолеть сложности помогают системы поддержки принятия решений (СППР), которые определяются как человеко-машинные системы, позволяющие руководителям для принятия решений использовать свои знания, опыт и интересы, объективные и субъективные модели, оценки и данные, а также опыт принятия групповых решений [1]. С другой стороны, СППР, варьируя методы генерации целей, их оценки и ранжирования, может влиять на субъективные предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР), и тем способствовать принятию лучших решений. Настоящая работа и посвящена описанию формализмов, которые позволят компьютерной системе в автоматизированном режиме определять цели обеспечения безопасности КИС.

1. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ЗАЩИТЫ

Средством реализации автоматизированных бизнес-процессов компании является корпоративная информационная система (КИС). Поэтому вопрос о защите КИС правомерно ставить как вопрос о защите выполняемых в ней бизнес-процессов. В работе [2] подчеркивались преимущества, когда защищаемыми активами становятся бизнес-процессы, а именно: возможность оценить ущерб как материальные потери от неэффективной/некорректной работы, простоев бизнес-процессов; оправдать бюджет на защиту; сформировать реально обоснованную потребностями бизнеса политику информационной безопасности; обосновать достаточность планируемых средств защиты; проектировать систему защиты одновременно с разработкой КИС.

Функциональность ИТ-составляющей бизнес-процесса на референсном (логическом) уровне будем представлять моделью OSE/RM (Open System Environment/Reference Model) группы POSIX (Portable Operating System Interface for Unix) [3], представляющей КИС как сочетание платформенного и прикладного компонентов, а также проекций передней плоскости модели на плоскости защиты и администрирования (рис. 1).

Модель представляется в виде матрицы типов компонентов среды, состоящей из трех уровней и четырех функциональных групп в каждом:

— компоненты служб и сервисов промежуточного, системно-прикладного слоя (MW);

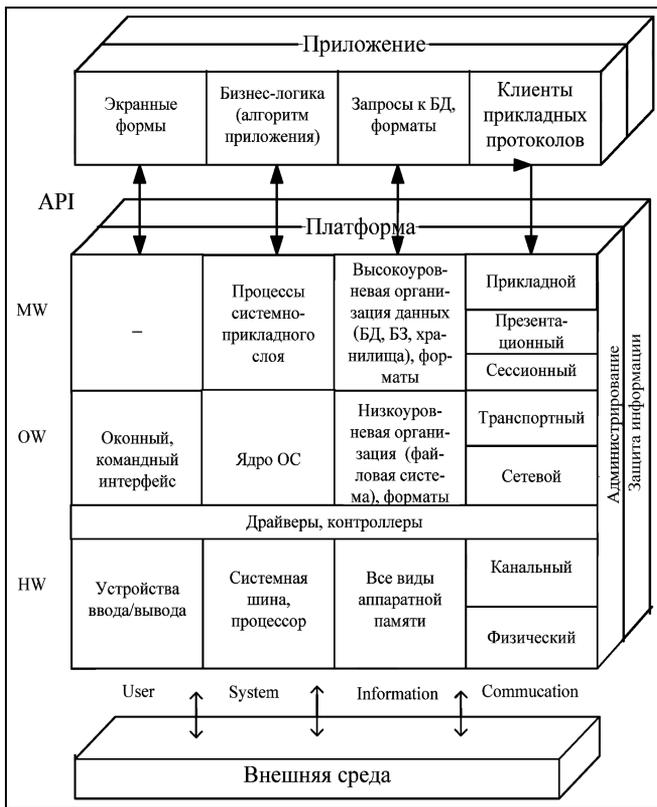


Рис. 1. Модель OSE/RM

— компоненты операционных систем или операционного слоя (OW);

— аппаратный слой (HW).

Функциональные группы компонентов в данной модели составляют:

— компоненты, обеспечивающие интерфейс с пользователем (User);

— компоненты, обеспечивающие все необходимые процессы в системе (System);

— компоненты, обеспечивающие организацию, представление, доступ и хранение данных (Information);

— компоненты телекоммуникационной среды, обеспечивающие взаимосвязь информационных систем (Communication); данный уровень представляет собой модель взаимосвязи открытых систем (OSI/RM — Open System Interconnection/Reference Model).

Приложение служит для реализации бизнес-задач, оно, собственно, и определяет содержимое бизнес-процесса. Платформа оказывает системные услуги приложению при его функционировании, которые вызываются посредством API (application program interface)-функций. Разумеется, приложений, необходимых для выполнения функций бизнес-процесса и «сидящих» на одной платформе, может быть несколько. Целью защитной компо-

ненты должно стать обеспечение информационной безопасности компонент бизнес-процесса, реализуемых «клетками» передней плоскости.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Первый шаг, осуществляемый СППР при проектировании комплексной системы защиты (КСЗ), под которой понимается комплекс программно-аппаратных средств защиты, заключается в формировании целей, которым она должна удовлетворять. Решение о необходимости защиты, как правило, принимается руководством организации, здесь важно понимание стратегических вопросов: какой уровень \overline{KS} защиты необходим, чтобы обеспечить безопасное и непрерывное функционирование бизнеса; сколько будет стоить защита данного уровня St ; какой ущерб U понесет компания в случае, если защита окажется недостаточно эффективной. Рис. 2 иллюстрирует эту взаимосвязь.

Набор целей достаточно стандартный, однако ЛПР может отдать предпочтение одному из следующих вариантов:

— если ЛПР ориентируется на минимальную стоимость системы защиты, то уровень безопасности \overline{KS} будет, соответственно, невысок, а ущерб U — максимальным, т. е.

$$St^{\min} \Rightarrow \overline{KS}^{\min} \Rightarrow U^{\max}, \quad (A)$$

— если ЛПР потребует обеспечить максимальную безопасность, то надо быть готовым к тому, что и стоимость такой системы окажется максимальной, но зато, можно уверенно предположить, что ущерб будет минимальным (если случится), т. е.

$$\overline{KS}^{\max} \Rightarrow St^{\max} \Rightarrow U^{\min}, \quad (B)$$

— если ЛПР придерживается стратегии приемлемого (а не минимального) ущерба $U < U^*$, то получит уровень защиты и стоимостные затраты в

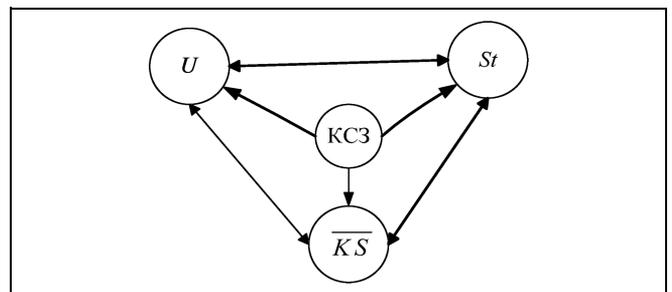


Рис. 2. Взаимосвязь стратегических целей

пределах от минимально до максимально возможных, т. е.

$$U < U^* \Rightarrow \overline{KS}^? \Rightarrow S_i^? \quad (B)$$

Выбор того или иного варианта развития событий — суть принятия решения на стратегическом уровне; СППР может осуществить его двумя способами.

В соответствии с одним из них выбор делается автоматически, когда СППР на основании оценок рисков $Risk_i$ бизнес-процессов S_i , полученных подсистемой мониторинга [4], делает вывод о том, какой критерий должен быть главным. Алгоритм заключается в следующем:

а) на основании оценок ущерба $Pr(S_i)$ и угроз Y_i в работе [4] для рисков была получена следующая оценочная шкала «Риск»: «очень низкий», «низкий», «средний», «выше среднего», «высокий». Логично предположить (табл. 1), что если для S_i -го процесса:

— $Risk_i =$ «высокий», то СППР выбирает вариант целей (Б),

— $Risk_i =$ «средний» — вариант (В),

— $Risk_i =$ «очень низкий» — вариант (А).

б) если $Risk_i =$ «низкий» или $Risk_i =$ «выше среднего», то СППР проводит дополнительный анализ соотношения оценок ущерба $Pr(S_i)$ и угроз Y_i . Каждое лингвистическое значение шкалы «Риск» соответствует интервалу значений, полученных от произведения $Pr(S_i)$ на Y_i . Анализ заключается в том, что если значение произведения попадает в первую половину интервала шкалы, то СППР относит его в более низкую категорию; если оно попадает во вторую половину — то в категорию, лежащую правее (см. табл. 1).

В соответствии с другим способом СППР предлагает перечень возможных целей, которые хранятся в ее БД (разумеется, этот перечень может быть дополнен или модифицирован ЛПР):

— обеспечить безопасность бизнес-процессов в требуемом объеме;

— обеспечить безопасность бизнеса в рамках выделяемых средств;

— минимизировать ущерб, наносимый компанией, если защита окажется недостаточной;

— строить защиту, исходя из установленных пороговых значений приемлемого ущерба;

— выделить ресурсы на организацию защиты информационных активов компании в достаточном объеме;

Таблица 1

Выбор целей в зависимости от риска

S_i^{\min}	?	$U < U^*$?	\overline{KS}^{\max}
Очень низкий	Низкий	Средний	Выше среднего	Высокий

— минимизировать стоимость выделяемых на организацию защиты ресурсов.

Эксперты (имеется в виду, что работает группа экспертов) или ЛПР выбирают те или иные цели, а СППР отслеживает, чтобы этот выбор, в соответствии с вариантами (А), (Б) и (В), был непротиворечив и согласовывал их. Согласование можно проводить разными способами [1], в СППР может быть заложено несколько методов с тем, чтобы ЛПР мог выбрать процедуру согласования в зависимости от жесткости предъявляемых требований.

Тем самым СППР формирует постановку задачи (А), (Б) и (В) для рационального выбора защитных механизмов и в, конечном итоге, средств защиты.

3. ДЕТАЛИЗАЦИЯ ЦЕЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТЬ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Поскольку объектами защиты являются бизнес-процессы, реализация которых в КИС представляется в виде «куба» OSE/RM (см. рис. 1), перечень целей безопасности для проектируемой КСЗ целесообразно также структурировать в соответствии с этой моделью. В стандартах по информационной безопасности под безопасностью понимается обеспечение конфиденциальности данных, сохранности от подделки, доступности к данным и услугам, которые осуществляются как приложениями пользователям, так и платформой приложениям. При построении бизнес-процессов «клетки» OSE/RM реализуются конкретными данными, программным и аппаратным обеспечением. Эти реализации и подлежат защите. Тогда задача в том, чтобы по каждому S_i -му бизнес-процессу ($1 \leq i \leq N$, N — число бизнес-процессов, образующих функциональный состав данной КИС) необходимо обеспечить безопасность реализации каждой p -й «клетки» модели ($1 \leq p \leq P$, P — число реализованных «клеток» среды S_i -го бизнес-процесса) и цели безопасности формируются СППР на основании состава реализаций «клеток». Алгоритм детализации целей изображен на рис. 3. Дадим некоторые комментарии к блокам, требующим пояснения.

В блоке 2 определяются «клетки», подлежащие защите. Поэтому СППР предъявляет экспертам для выбора следующий список целей S_i -го бизнес-процесса:

1) обеспечить безопасность реализации «клетки» 1;

2) обеспечить безопасность реализации «клетки» 2;

...

P) обеспечить безопасность реализации «клетки» P .

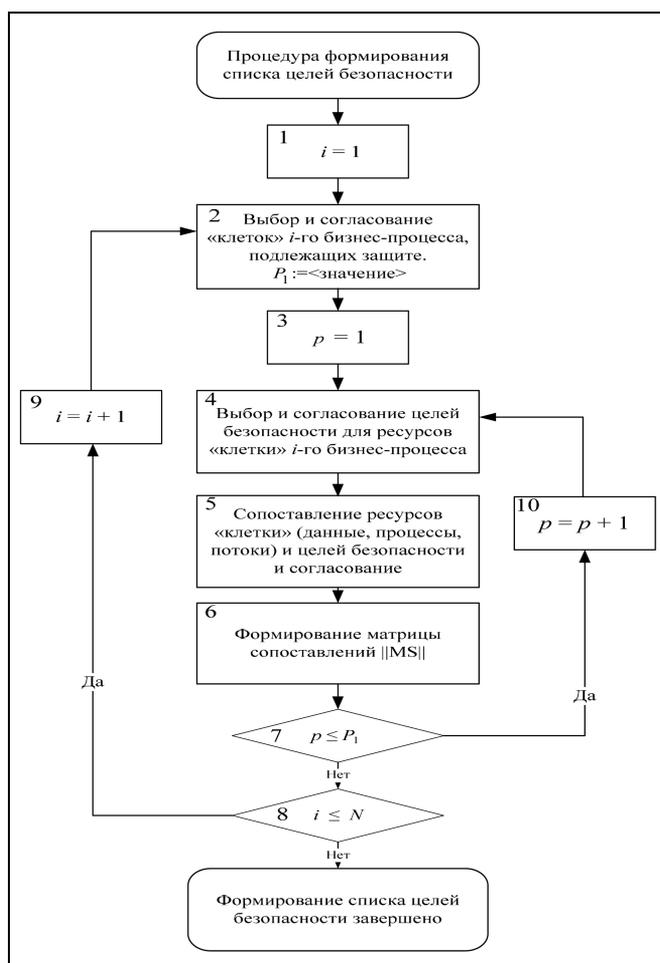


Рис. 3. Алгоритм процедуры детализированного формирования списка целей

Указанные цели могут выбираться экспертами и с помощью графического представления модели OSE/RM (см. рис. 1) рассматриваемой КИС. Затем СППР согласует списки. Пусть согласованный список состоит из целей для P_1 «клеток» ($P_1 \leq P$).

В блоке 4 СППР определяет, какие, по мнению экспертов, из свойств безопасности должны быть обеспечены для p -й «клетки». Поэтому СППР проводит дальнейшую детализацию целей для выбранных «клеток». Эта процедура может осуществляться автоматически, на основании матрицы соответствия j -го оценочного критерия ценности информационных ресурсов и p -й «клетки», полученной подсистемой мониторинга [4] $Z = \|z_{pj}\|$, где

$$z_{pj} = \begin{cases} 1 & \text{— соответствие есть,} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Если, например, БД некоторой «клетки» оценивалась по критерию «Нормативные акты, регламентируемые актив», то это может быть база пер-

сональных данных сотрудников, доступ к которой на основании закона [5] конфиденциален. А если речь идет об электронном магазине, то все «клетки», отвечающие за связь и организацию удаленного взаимодействия, должны обеспечивать высокую доступность, так как именно эти «клетки» оценивались по критерию «Приносимый доход» или «Объем недополученного дохода». Анализ, указывающий на связь оценочного критерия и свойства безопасности, производится в подсистеме предпроектного проектирования при формировании списка критериев. Таким образом, СППР делает выводы о том, какие свойства безопасности (конфиденциальность (K), целостность (C), доступность (D)) надо обеспечить тем или иным «клеткам» и предъявляет их экспертам для утверждения или модификации, если экспертов выводы СППР не устраивают; после чего списки согласовываются.

В результате каждой p -й «клетке» ставится в соответствие вектор целей $\overline{KS}_p(C, D, K)$, содержащий одно, два или все три свойства (цели) безопасности, которые надо обеспечить.

В блоке 5 СППР уточняет и согласовывает с какими конкретно информационными объектами, ассоциированными с «клеткой», соотносятся цели вектора \overline{KS}_p . Такими объектами могут быть хранимые, обрабатываемые или передаваемые данные пользовательских массивов, служебные данные операционной системы или самой системы безопасности; коды и процессы платформенного, прикладного и защитного компонентов, а также объекты аппаратного слоя (см. рис. 1). Обозначим список детализированных согласованных целей $Sp_p(sp_1^K, \dots, sp_k^K, sp_1^C, \dots, sp_c^C, sp_1^D, \dots, sp_d^D)$, где (sp_1^K, \dots, sp_k^K) — подмножество целей, которые обеспечивают свойство конфиденциальности (K), (sp_1^C, \dots, sp_c^C) — свойство целостности (C) и (sp_1^D, \dots, sp_d^D) — доступности (D) к объектам p -й «клетки».

В блоке 6 СППР по каждой «клетке» формирует матрицу сопоставления $\|MS_p\|$ размера $3 \times \max(k, c, d)$, где

$$ms_{ij}^p = \begin{cases} 1 & \text{— } i\text{-я цель присвоена } j\text{-му объекту} \\ & \text{ } p\text{-й "клетки",} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Описанную процедуру формирования и согласования целей СППР проводит циклически по каждой «клетке» каждого бизнес-процесса.

В результате СППР сформирует распределение по «клеткам» детализированных и согласован-

ных списков Sp_p , векторов \overline{KS}_p и матриц таких сопоставлений $\|MS_p\|$. Объединяя списки Sp_p , СППР получит согласованные списки возможных целей

$Sp_i = \bigcup_{p=1}^{P_1} Sp_p$, обеспечивающих безопасность S_i -х бизнес-процессов, $i = 1, \dots, N$.

4. ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ

Цели Sp_i должны описывать проектное решение системы защиты в соответствии с требуемым уровнем безопасности. Задача компьютерной системы заключается в том, чтобы на основании определенных критериев уметь оценивать варианты проектируемой системы. В качестве таких критериев логично использовать параметры «уровень конфиденциальности» (K), «уровень целостности» (C), «уровень доступности» (D), которые и составят критериальные векторы безопасности $\overline{KS}_i(C, D, K)$, хотя, если рассуждать на детальном уровне, то речь следует вести не о векторах, а о критериальных матрицах безопасности $\|KS_i\|$ (для обозначения целей безопасности и их оценочных критериев используются одни и те же обозначения, так как семантически их смысл одинаков). Значения \overline{KS}_i задаются как термы T лингвистических переменных или как балльные оценки (табл. 2), важно, чтобы они были однородными.

Указанные шкалы сформированы на основании нормативных и законодательных документов [6] и хранятся в базе данных СППР. Однако в подсистеме предпроектного проектирования они могут быть модифицированы и согласованы.

4.1. Процедура определения значений критериев

Эксперты должны выразить свои требования к безопасности бизнес-процессов в форме тех или иных значений критериев \overline{KS}_i , а стало быть, необходимо реализовывать процедуру определе-

ния целевых значений векторов безопасности $\overline{KS}_i^{\text{цель}}(K, C, D)$.

Автоматическая процедура формирования целевых векторов состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Определение базового уровня критериев в соответствии с приоритетом бизнес-процесса.

Шаг 2. Определение предпочитаемого уровня на основе субъективной значимости критериев для эксперта.

Шаг 3. Определение ожидаемого уровня критериев с учетом степени риска среды.

Заметим, что в этой процедуре СППР применяет исключительно эвристические алгоритмы, которые могут быть модифицированы, дополнены или заменены прямым вводом экспертных оценок.

В подсистеме мониторинга [4] были получены оценки ценности информационных ресурсов, сопоставленных «клеткам» $Pr(K_p)$ и средние по бизнес-процессу $Pr(S_i)$ по шкале «высокий-4», «средний-3», «низкий-2», «очень низкий-1», «отсутствует-0» (через дефис здесь и далее в лингвистических шкалах приведены балльные оценки). Поэтому СППР может определять значения в двух режимах: обобщенном, на уровне бизнес-процессов (определяются значения векторов \overline{KS}_i) и детальном — для «клеток», и тогда речь следует вести о матрицах $\|KS_i\|$. Для простоты изложения опишем алгоритм обобщенного режима, уровень «клеток» работает аналогично.

Рассмотрим бизнес-модель, состоящую из трех бизнес-процессов банковского сектора:

бизнес-процесс S_1 : расчетно-кассовое обслуживание юридических лиц;

бизнес-процесс S_2 : стратегическое планирование;

бизнес-процесс S_3 : депозитарное обслуживание.

Шаг 1. Определение базового уровня. Средние оценки $Pr(S_i)$ определяют вектор приоритетов $Pr^{b/p}(Pr(S_1), Pr(S_2), \dots, Pr(S_N))$, где N — число бизнес-процессов. Пусть для нашей бизнес-модели

Таблица 2

Критерии безопасности и их лингвистические значения

K — конфиденциальность	Терм	Коммерческая тайна	Строго конфиденциально	Конфиденциально	Внутренний документ	Несекретно
	Балл	4	3	2	1	0
C — целостность	Терм	Очень высокая	Высокая	Средняя	Низкая	Отсутствует
	Балл	4	3	2	1	0
D — доступность	Терм	Очень высокая (24 × 7)	Высокая (24 × 5)	Средняя (8 × 7)	Низкая (8 × 5)	Не поддерживается
	Балл	4	3	2	1	0



подсистема мониторинга сформировала вектор $Pr^{b/p}(4, 3, 1)$.

Для каждого бизнес-процесса на основании вектора $Pr^{b/p}$ СППР назначает базовые значения критериев безопасности, т. е. получим векторы базовых значений критериев безопасности по всем процессам $K^B(T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*)$, $C^B(T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*)$, $D^B(T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*)$, где $T_i^* = Pr(S_i)$ — базовые значения критериев S_i -го бизнес-процесса.

Таким образом, получим базовые вектора безопасности $K^B(4, 3, 1)$, $C^B(4, 3, 1)$, $D^B(4, 3, 1)$ (табл. 3). Эти же значения получают и все «клетки» реализаций данных бизнес-процессов в соответствии с моделью OSE/RM.

Шаг 2. Определение предпочитаемого уровня. Специфика бизнеса влечет и разные требования к защите, т. е. значимость тех или иных критериев безопасности для разных типов бизнеса разная, например, банковский сектор зачастую отдает предпочтение целостности БД экономической информации, нежели ее конфиденциальности. Поэтому СППР должна выяснить точку зрения ЛПР относительно важности для него критериев \overline{KS}_i . Важность оценивается по шкале «очень высокая-4», «высокая-3», «средняя-2», «низкая-1» (см. пример в табл. 4). Таблицы типа табл. 4 заполняются для каждого бизнес-процесса и согласовываются экспертами заранее в подсистеме предпроектного проектирования.

В итоге по бизнес-процессам СППР получит матрицу предпочтений $TS^{b/p} = ||ts_{ij}||$, где ts_{ij} — оценки значимости j -го критерия для i -го бизнес-процесса.

Оценки значимости критериев корректируют базовый уровень безопасности, т. е. векторы $D^B(T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*)$, $C^B(T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*)$, $K^B(T_1^*, T_2^*, \dots, T_N^*)$ подправляются величинами ts_{ij} , например, если:

- $ts_{ij} = 3$, то соответствующее базовое значение остается без изменений,
- $ts_{ij} = 2$, то базовое значение уменьшается на 1,
- $ts_{ij} = 1$, то базовое значение уменьшается на 2.

Тогда получим табл. 5 предпочитаемых уровней критериев безопасности

или в векторном виде $K^W(3, 3, 1)$, $C^W(3, 1, 0)$, $D^W(4, 1, 0)$.

Вообще говоря, на этом этапе можно завершить алгоритм, если эксперты решат не учитывать оценки риска среды, и тогда при выборе средств защиты можно либо ориентироваться на матрицу предпочитаемых уровней, либо вначале производить выбор средств по базовой матрице, а в случае,

если таких средств не найдется, ослаблять условия выбора до матрицы предпочитаемых уровней.

Шаг 3. Определение ожидаемого уровня. В подсистеме мониторинга на основе рейтинга уязвимостей бизнес-процесса и потенциала возможного нарушителя были получены оценки угроз Y_p , которые могут быть реализованы в «клетках» среды, а также оценки всего бизнес-процесса Y_i [4]. В работе [7] приведена классификация уязвимостей по критериям безопасности, к нарушению которых ведет использование уязвимости злоумышленником. На основании этой классификации СППР получает матрицу оценок угроз $Y^{b/p} = ||y_{ij}||$, где y_{ij} — оценка опасности уязвимостей i -го бизнес-процесса по j -му критерию. Пусть для нашего примера эти

$$\text{оценки представлены матрицей } Y^{b/p} = \begin{pmatrix} 4 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

Ненулевые значения говорят о том, что ресурсы данного бизнес-процесса содержат уязвимости, которыми может воспользоваться нарушитель.

Таблица 3

Базовые уровни критериев безопасности бизнес-процессов

Наименование бизнес-процесса	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Расчетно-кассовое обслуживание юридических лиц	4	4	4
Стратегическое планирование	3	3	3
Депозитарное обслуживание	1	1	1

Таблица 4

Значения важности критериев безопасности

Наименование бизнес-процесса	Важность критерия		
	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Расчетно-кассовое обслуживание юридических лиц	2	2	3
Стратегическое планирование	3	2	1
Депозитарное обслуживание	3	2	1

Таблица 5

Предпочитаемые уровни критериев безопасности бизнес-процессов

Наименование бизнес-процесса	Предпочитаемый уровень		
	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Расчетно-кассовое обслуживание юридических лиц	3	3	4
Стратегическое планирование	3	1	1
Депозитарное обслуживание	1	0	0

Они должны учитываться при планировании защиты, т. е. ожидаемые уровни критериев безопасности K^0 , C^0 и D^0 должны быть построены на основе предпочитаемых, но с учетом поправок на значения оценок угроз. В частности, возможны варианты:

— если оценка опасности нулевая, то уровень защиты для этого бизнес-процесса по данному критерию может быть снижен также до нуля;

— поднимать предпочитаемые уровни на значения оценки угрозы, но максимум до базовых значений (тогда сознательно допускаем некоторую «дырку» в защите, если полученная сумма окажется меньше максимально возможного значения критерия), табл. 6;

— если оценки угроз ненулевые, поднимаем оценки K , C и D до максимального уровня.

В табл. 7 приведен пример целевых векторов, числовые значения которых получены в результате выполнения шагов 1–3. Функции, в соответствии с которыми осуществлялись поправки, представляют собой эвристики, их список может изменяться и дополняться экспертами, именно поэтому в таблице приведено k ожидаемых уровней.

Если S_i -й бизнес-процесс обменивается данными с бизнес-процессом S_j , то целевые значения должны быть выровнены: если входящий в S_j -й бизнес-процесс информационный поток имеет больший уровень по некоторому критерию, то значение S_j -го бизнес-процесса по этому критерию надо увеличить.

Таблица 6

Ожидаемые уровни критериев безопасности бизнес-процессов

Наименование бизнес-процесса	Ожидаемый уровень		
	K	C	D
Расчетно-кассовое обслуживание юридических лиц	4	4	4
Стратегическое планирование	4	2	2
Депозитарное обслуживание	1	0	3

Таблица 7

Наборы целевых векторов защиты бизнес-процессов

Уровни защиты бизнес-процесса S_i	K			C			D		
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
Базовый	4	3	1	4	3	1	4	3	1
Предпочитаемый	3	3	1	3	1	0	4	1	0
Ожидаемый 1	4	4	1	4	2	0	4	2	3
— " — 2	4	4	0	4	4	0	4	4	4
...
— " — k	3	3	1	4	1	2	2	0	0

Таким образом, СППР получает набор целевых векторов для i -х бизнес-процессов $\overline{KS_i^{цель}}(K(T^*), C(T^*), D(T^*))$, где $K(T^*)$, $C(T^*)$, $D(T^*)$ — уровни конфиденциальности, целостности и доступности соответственно, которые должна обеспечивать КСЗ для S_i -х бизнес-процессов, а T^* — означает выбранные значения (термы) лингвистических переменных. Если описанный алгоритм отрабатывает в детализированном режиме, то СППР получит наборы векторов безопасности по «клеткам» $\overline{KS_p^{цель}}(K(T^*), C(T^*), D(T^*))$. Это означает, что цели, обеспечивающие безопасность на уровне бизнес-процессов или на уровне «клеток», сформированы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные компьютерные методы и алгоритмы группового принятия решений позволяют в автоматизированном режиме формировать цели при проектировании комплексной системы защиты для корпоративной информационной системы. В дальнейшем СППР должна будет сформировать возможные стратегии, позволяющие достичь целевых векторов $\overline{KS_i^{цель}}$. В качестве стратегий рассматриваются различные варианты состава защитных средств, выбор которых осуществляется с учетом критериев стоимости St и ущерба U , т. е. должна решаться одна из задач (А), (Б) или (В).

ЛИТЕРАТУРА

1. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий. — М.: СИНТЕГ, 2005. — 224 с.
2. Лукинова О.В. Формализация задачи планирования защиты распределенной компьютерной сети на основе бизнес-процессного подхода // Надежность. — 2009. — № 1. — С. 72–80.
3. ISO/IEC TR 14252 — 1996. Guide to the POSIX Open System Environment.
4. Лукинова О.В. Компьютерные методы мониторинга и анализа защищенности при функционировании автоматизированных бизнес-процессов компании // Открытое образование. — 2011. — № 4. — С. 37–47.
5. Закон Российской Федерации № 152 «О персональных данных» от 27.07.2006.
6. Закон Российской Федерации «О государственной тайне» от 27.07.1993.
7. Сердюк В.А. Новое в защите от взлома корпоративных систем. — М.: Техносфера, 2007. — 360 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Цвиркуном.

Лукинова Ольга Васильевна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-89-70, ✉ Lobars@mail.ru.



ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО ПРОЕКТА РЕАЛИЗАЦИИ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

И.В. Пырлина

Предложен оптимальный набор критериев выбора наилучшего проекта реализации сервис-ориентированной архитектуры информационной системы и метод агрегирования их оценок по совокупности критериев качества архитектуры. Проанализировано семь проектов архитектуры сервисов и представлен результат ранжирования приоритетности проектов по заданным критериям. Показано, что выбор проекта зависит от оценок по совокупности критериев в основных областях: внутренняя организация информационной системы, организация изменений и политик, готовность процессов и бизнес-сервисов, минимизация операционных рисков.

Ключевые слова: метод порогового агрегирования, сервис-ориентированная архитектура, операционные риски, критерии эффективности, ранжирование.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция сервис-ориентированной архитектуры (СОА) предполагает создание архитектуры приложения с хорошо структурированной топологией интерфейсов, предоставляющих возможность доступа к функциональности приложений из других программ при помощи открытых стандартов [1]. Прикладная логика реализуется, как и раньше, в отдельных приложениях и подсистемах, а для доступа к функциям приложений используется специальная «обертка» в виде Web-сервиса, позволяющая вызывать данную функциональность из других приложений и подсистем. Существуют разные определения понятия СОА [1, 2].

Данная концепция позволяет решить проблему интеграции различных систем, работающих в рамках организации, дает возможность многократного их применения для решения различных задач. Впервые СОА была предложена компанией «Gartner Group» в 1996 г. Однако реализация подобной архитектуры требовала развития стандартов и технологий, поддерживающих ее. Проблема выбора наилучшего проекта реализации СОА в рамках линии бизнеса или компании знакома предприятиям в любой отрасли. С момента появления концепции СОА предприятия ищут пути ее успешной реализации посредством информационных технологий. Они получают большое число предложений от

компаний-поставщиков решений, которые, в свою очередь, создали различные платформы на базе СОА. Каждое предлагаемое проектное решение реализации СОА отличается своими достоинствами и недостатками. К приложениям с СОА предъявляются требования по гибкости, времени ожидания обращения к сервисам, вероятности отказа обработки запроса от системы потребителя, минимизации возможных рисков реализации инновационной архитектуры (рисков персонала, рисков информационных систем, технических рисков). Важно, что под эффективностью проекта в данном случае понимается не только экономическая эффективность и прибыльность проектов, но и общее влияние реализации СОА на работу комплекса информационных систем компании. Как же выбрать эффективный проект реализации СОА информационной системы (ИС)?

На практике задачи отбора эффективных проектов реализации СОА решаются путем анализа характеристик проекта с помощью линейной свертки критериев эффективности. Часто для целей принятия решения используются также показатели экономической эффективности проекта. Однако в случае СОА-приложений выгоды от проектов скорее качественные, и лишь косвенно оказывают влияние на ключевые количественные показатели предприятия. А линейную свертку основных характеристик проекта нельзя считать достаточно объ-

ективной, поскольку высокие оценки одних показателей компенсируют низкие оценки по другим.

В настоящей статье сформулированы основные критерии качества СОА и предлагается метод выбора эффективного проекта реализации сервис-ориентированной архитектуры ИС, предполагающий применение метода порогового агрегирования [3, 4] для оценок по совокупности критериев качества архитектуры. На практике предложенный метод применен для анализа семи проектов реализации СОА в различных отраслях и продемонстрирован выбор наиболее эффективного проекта, исходя из сравнения критериев.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Различные альтернативы реализации ИС с СОА можно оценить по вектору критериев. Определим альтернативу как проект реализации, который оценивается по нескольким ключевым характеристикам или критериям.

Задача состоит в ранжировании проектов и выборе наиболее эффективного из них. Выбор осуществляется с помощью метода порогового агрегирования четырехградационных ранжировок критериев. В соответствии с данным методом строится преобразование оценок критериев проектов по правилу агрегирования, что позволяет проранжировать проекты и дать более точную оценку их эффективности.

Для отработки предлагаемого метода выбрано несколько предприятий нефтегазовой и банковской отраслей. Такой выбор обоснован тем, что проекты внедрения ИС с СОА сравнимы между собой по архитектуре и перечню решаемых задач. Были подготовлены опросные листы экспертов-архитекторов компании SAP в рамках реализации или анализа проектов, используемые для оценки зрелости ИС. Краткое описание соответствующих проектов (проекты 1–7) приведено в Приложении 1. В рамках каждого проекта также анализировались риски реализации СОА.

2. АНАЛИЗ РИСКОВ

Риски ИС с СОА оценивались на базе статистики ошибок, собранной по анализируемым проектам. Качество ИС напрямую выражается через количество ошибок в различных компонентах системы, соответственно и риски ИС с СОА представляются в виде рисков возникновения ошибок компонентов ИС. Воспользуемся следующей классификацией рисков ИС: риски ввода-вывода результатов, функциональные риски, риски связующего программного обеспечения (ПО), риски обработки данных, системные риски.

Всего было проанализировано 4435 ошибок по семи проектам за период с 2006–2010 гг. (табл. 1). Все ошибки разделены на четыре приоритета по степени ущерба и важности их устранения («очень высокий», «высокий», «средний» и «низкий»).

Предлагается использовать риски как отдельную группу критериев, влияющих на выбор проекта архитектуры. Статистика по рискам с помощью максимальной свертки будет агрегирована для финального ранжирования проектов.

Таблица 1

Статистика возникновения рисков реализации

Но- мер про- екта	Приори- тет	Тип риска				
		Риски ввода- вывода результатов	Функ- цио- наль- ные риски	Ри- ски свя- зую- щего ПО	Ри- ски обра- ботки дан- ных	Сис- тем- ные ри- ски
1	Очень высокий	1	19	1	4	9
	Высокий	44	463	25	170	128
	Средний	140	1251	82	509	283
	Низкий	1	12	1	6	7
2	Очень высокий	0	7	0	1	7
	Высокий	24	109	24	21	73
	Средний	45	151	29	18	192
	Низкий	3	8	20	1	14
3	Очень высокий	0	0	0	0	1
	Высокий	0	0	0	0	0
	Средний	5	11	1	4	3
	Низкий	1	1	0	0	1
4	Очень высокий	0	0	0	1	0
	Высокий	0	17	1	5	5
	Средний	10	59	1	10	18
	Низкий	0	0	0	0	3
5	Очень высокий	0	2	1	0	1
	Высокий	9	26	2	5	13
	Средний	10	49	3	23	10
	Низкий	0	1	0	2	0
6	Очень высокий	0	1	0	1	0
	Высокий	2	48	0	17	5
	Средний	6	74	3	26	5
	Низкий	0	0	0	0	0
7	Очень высокий	0	1	0	0	1
	Высокий	0	4	1	2	5
	Средний	3	4	2	2	4
	Низкий	0	0	0	0	0
Итого		304	2318	197	828	788



3. ОПИСАНИЕ КРИТЕРИЕВ

Определим качество архитектуры решения как совокупность свойств и признаков, выявляющих соответствие информационной системы концепции СОА. Для определения критериев рассмотрим ИС в аспекте эффективности организации системы, результативности ее работы, рациональности управления сервисами и данными, наличия политик и элементов платформы, а также проведем анализ операционных рисков. Такой подход к оценке качества ИС в большей степени отвечает потребностям совершенствования управления ею и может дать информацию для мониторинга и выработки конкретных мер по модернизации таких систем. Важно, что успешность проекта реализации СОА определяется не только выбранным ПО и архитектурой решения, но и своевременной идентификацией и минимизацией рисков при сервис-ориентированном подходе к созданию ИС.

По существу, предлагаемый подход состоит в оценке качества ИС в следующих основных областях:

- внутренняя организация ИС с сервис-ориентированной архитектурой (качество организации процессов, применение основных принципов СОА при организации данных, инструментов и сервисов);

- организация изменений и политик (упорядоченность выполняемых функций, комплексность политик и мер сопровождения ИС);

- готовность процессов и бизнес-сервисов (уровень стандартизации процессов, проработки новых подходов к формализации бизнес-операций и формированию потребностей ИС, проработка данных);

- операционные риски (потенциальные убытки исправления ошибок ИС).

Каждая область содержит набор критериев сравнения проектов. Рассмотрим их подробнее.

3.1. Внутренняя организация ИС с сервис-ориентированной архитектурой

Степень реализованности сервисной платформы определяется по наличию необходимых и достаточных компонентов платформы, удовлетворяющих концепции СОА. Среди таких компонентов выделяются:

- платформа для обеспечения интерфейса пользователя в целях доступа к сервисам;

- платформа для обеспечения использования разнородных источников и получателей данных в сервисах;

- платформа для обеспечения использования сервисов в бизнес-процессах;

- среда разработки и оркестрации сервисов.

Соответственно ранги по степени реализованности сервисной платформы имеют следующий вид: наличие одного из четырех компонентов платформы (1), наличие двух компонентов (2), наличие трех компонентов (3), наличие всех компонентов (4).

Уровень отказоустойчивости (High availability) сервисов, т. е. существуют ли готовые или находящиеся в разработке методы обеспечения отказоустойчивости корпоративных сервисов в смысле бизнес-перспективы и возможности отработки ситуаций, когда сервисы недоступны. По определению, сервисы в рамках ИС с СОА должны предоставлять высокий уровень осведомленности, готовности и достижимости сервисов, т. е. должны обладать обозримостью (visibility) между потребителями и поставщиками. Осведомленность предполагает предоставление методов информирования потребителей поставщиками о наличии сервисов. Готовность сервиса означает уровень участия поставщика сервиса во взаимоотношениях с потребителями сервисов. Достижимость — это связь между сервисными участниками путем обмена информации, наличие и качество соответствующих каналов связи. Оценка критерия различает методы информирования о доступности сервисов, уровень готовности и достижимости: 1 — низкий уровень осведомленности потребителей сервисов, низкая степень готовности сервисов и достижимости; 2 — публикация запросов потребителей сервисов, средняя степень готовности и достижимости сервисов; 3 — рассылка информации о сервисе потребителям, высокая готовность и достижимости сервисов; 4 — публикация в репозитории, очень высокая готовность и достижимости сервисов.

Степень гибкости и масштабирование СОА-платформ ориентированы на такие аспекты, как адекватный подбор конфигурации в смысле производительности, возможности поддержки различных уровней доступности сервисов, возможности обеспечения потребностей развития бизнеса при повышении требований по соглашению об уровне сервиса (service level agreement — SLA) и увеличения нагрузки. В рамках данного критерия определим ранги: 1 — низкая гибкость и масштабируемость платформы; 2 — средняя гибкость и масштабируемость платформы; 3 — высокая гибкость и масштабируемость платформы; 4 — очень высокая гибкость и масштабируемость платформы.

Готовность существующих приложений определяет уровень доработки системы или изменения текущей архитектуры, чтобы выделить и реализовать сервисы. Значения рангов: 1 — необходимо дорабатывать все системы ландшафта; 2 — необходимо дорабатывать большую часть систем ландшафта; 3 — в ландшафте имеются системы, предоставляющие сервисы; 4 — нет необходимости дорабатывать системы.

3.2. Организация изменений и политик

Степень повторного использования в архитектуре сервисов предприятия определяется наличием продуманного и целостного описания процедуры преобразования шагов процессов в шаги сервисов для их поставщиков. Ранги определяются по степени повторного использования: 4 — уровень повторного использования функциональности превышает 40 %; 3 — составляет от 20 до 40 %; 2 — от 10 до 20 %; 1 — от 0 до 10 %.

Возможности по проектированию сервисов — критерий определения уровня знаний проектировщика сервисов, необходимых для корректной обработки новых запросов на сервисы или изменения существующих сервисов. Иначе говоря, владеет ли он методами оркестровки или перестройки сервисов и знает ли сильные и слабые стороны каждого из подходов. Ранги: 4 — очень высокий уровень знаний; 3 — высокий уровень; 2 — средний уровень; 1 — низкий уровень.

Возможности по поддержке процесса предоставления сервисов: имеются ли специально подготовленные сотрудники для поддержки деятельности по предоставлению сервисов или «осервествлению» текущих информационных систем. Ранги: 4 — очень высокий уровень подготовки; 3 — высокий уровень; 2 — средний уровень; 1 — низкий уровень.

Управление изменениями поставщика сервисов — критерий определения уровня готовности поставщиков сервисов к их предоставлению, включая поддержку бизнес-процессов и сервисов, и их обеспечение. Ранги: 4) — очень высокий уровень гибкости и надежности поставщика сервисов; 3) — высокий уровень; 2) — средний уровень; 1) — низкий уровень.

Уровень сервиса (SLA) — критерий, обозначающий степень проработки соглашения об уровне сервиса, как со стороны бизнеса, так и со стороны информационных технологий. Он должен быть простым и конкретным, насколько это возможно: доступность, производительность, качество, время. Например: «Проверка кредитоспособности через портал: 99,99 % таких запросов, сделанных в рабочее время, должны обрабатываться за 0,8 с с качеством 100 %». Ранги: 4 — наличие SLA с системой контроля, штрафов и поощрений; 3 — наличие SLA с частичным контролем; 2 — не до конца проработанный SLA; 1 — отсутствие SLA.

3.3. Готовность процессов и бизнес-сервисов

Степень управления сервисами — критерий, определяющий уровень управления процессом построения ИС с СОА. Он позволяет определить преимущества стандартизации, уровень разбиения процессов на операции, обеспечивающий возможность повторного использования функциональ-

ности, соответствующие правила проектирования процессов. Важно обеспечить целостность процедуры управления жизненным циклом процессов и сервисов. Ранги определяются по степени управления процессами и сервисами: 4 — управление на уровне портфеля проектов; 3 — управление на уровне советов; 2 — выделенное единое управление сервисами по направлениям бизнеса; 1 — куросочное управление.

Степень согласованности основных данных означает, насколько одни и те же объекты данных имеют единую структуру и описание при работе с разными приложениями и процессами. При реализации ИС с СОА необходимо иметь согласованное представление о бизнес-партнерах, материалах, работниках, финансовой ситуации, организационной структуре и других основных объектах. Ранги: 4 — очень высокий уровень согласованности данных; 3 — высокий уровень согласованности данных; 2 — средний уровень; 1 — низкий уровень.

Степень согласованности данных о транзакциях. В отличие от основных данных, которые могут быть представлены как входные параметры, данные о транзакциях являются больше результатом какого-то бизнес-процесса. Чем больше они одинаковы с виду и по существу, тем меньше логических связей нужно для следующих шагов бизнес-процесса и подготовки параметров. Ранги: 4 — очень высокий уровень согласованности данных; 3 — высокий уровень согласованности данных; 2 — средний уровень; 1 — низкий уровень.

Контроль версионности¹ шагов процесса означает степень проработки подхода контроля изменений процессов и управления их версиями. При реализации ИС с СОА должны быть описания, как обеспечить бизнес-процесс (параметрами) и что ожидать от бизнес-процесса (результаты), насколько устойчиво описание входящих данных и предсказуемо описание результата сейчас и в будущем, как часто изменяется процесс. Ранги: 4 — отсутствие изменений процессов и высокая гранулярность сервисов; 3 — редкое изменение процессов и низкая гранулярность сервисов; 2 — частое изменение процессов и низкая гранулярность сервисов; 1 — отсутствие контроля версионности.

3.4. Минимизация операционных рисков

Анализ рисков, связанных с ошибками работы системы с СОА [5], осуществляется на основе классификации и статистики, приведенной в § 2.

Для каждого проекта внедрения (или альтернативы) делалась оценка архитектуры решения и готовности к внедрению приложений с СОА, а также

¹ Определим версионность как новые варианты существующих шагов процесса, измененных в связи с внедрением системы или правил ведения бизнеса.



предложение целевого состояния информационного ландшафта после внедрения ИС. Всего рассматривается семь проектов. Каждый проект получает оценки по критериям (см. Приложение 1), приведенным выше. Все критерии предполагают качественную оценку по шкале: 1 — низкий; 2 — средний; 3 — высокий; 4 — очень высокий.

4. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ АГРЕГИРОВАНИЯ

При разработке методики обработки данных одна из главных задач состояла в формировании наиболее адекватного и обоснованного суждения о качестве проекта ИС с СОА. Безусловно, эта задача не может быть решена в полной мере. В настоящей работе для ее решения применены метод порогового агрегирования и максиминный метод.

4.1. Методы порогового агрегирования

Без применения метода агрегирования предложенные критерии оценки ИС не могут дать четкого представления о том, какой проект наиболее выгодный. Для решения подобных задач наиболее часто применяется метод линейной свертки. Однако нередко он оказывается неэффективным в силу «компенсаторного» характера критериев, т. е. при агрегировании низкие оценки по одним критериям компенсируются высокими оценками по другим. В отличие от метода линейной свертки пороговый метод агрегирования [3, 4] основан на построении результирующего ранжирования по совокупности критериев, представленных четырьмя рангами. Агрегирование осуществляется в соответствии с пороговым правилом, которое позволяет построить бинарное отношение, определяющее предпочтение на множестве проектов.

Множество проектов ИС с СОА оценивается по семи критериям. Каждый критерий проекта ранжируется по четырехбалльной шкале.

Агрегирование происходит по «пороговому правилу»:

$$\begin{aligned} W_{rr} &= \{(x, y) | [v_1(x) < v_1(y)] \cup [v_1(x) = \\ &= v_1(y) \cap v_2(x) < v_2(y)] \cup [v_1(x) = v_1(y) \cap v_2(x) = \\ &= v_2(y) \cap v_3(x) < v_3(y)]\}, \end{aligned}$$

где x и y — сравниваемые альтернативы проектов, $v_1(x)$ и $v_1(y)$ — число единиц («1») в записях векторов x и y , $v_2(x)$ и $v_2(y)$ — соответственно число двоек («2»), а $v_3(x)$ и $v_3(y)$ — число троек («3»). Таким образом, отношение W_{rr} представляет собой матрицу — множество пар векторов, для которых либо в первом сравниваемом векторе число единиц меньше, чем во втором, либо при равном числе единиц число двоек в первом векторе меньше, чем во втором. Результат агрегирования — ранжирование векторов.

В случае четырех рангов и трех критериев все множество оценок разбивается на классы:

- 1) {1, 1, 1} — оценки «низко» по всем векторам;
- 2) {2, 1, 1}, {1, 2, 1}, {1, 1, 2} — оценки «низко» по всем векторам, кроме одного со значением «2»;
- 3) {3, 1, 1}, {1, 3, 1}, {1, 1, 3} — оценки «низко» по всем векторам, кроме одного со значением «3»;
- 4) {4, 1, 1}, {1, 4, 1}, {1, 1, 4} — оценки «низко» по всем векторам, кроме одного со значением «4»;
- 5) {2, 2, 1}, {2, 1, 2}, {1, 2, 2} — оценки «средне» по всем векторам, кроме одного вектора со значением «1»;
- 6) {1, 2, 3}, {2, 3, 1}, {1, 3, 2}, {2, 1, 3}, {3, 1, 2}, {3, 2, 1} — оценка по одному вектору «низко», по двум другим «средне» и «высоко»;
- 7) {1, 2, 4}, {2, 4, 1}, {1, 4, 2}, {2, 1, 4}, {4, 1, 2}, {4, 2, 1} — оценка по одному вектору «низко», по двум другим «средне» и «очень высоко»;
- 8) {1, 3, 3}, {3, 3, 1}, {3, 1, 3} — оценки «высоко» по всем векторам, кроме одного со значением «1»;
- 9) {1, 3, 4}, {3, 4, 1}, {1, 4, 3}, {3, 1, 4}, {4, 1, 3}, {4, 3, 1} — оценка по одному вектору «низко», по двум другим «высоко» и «очень высоко»;
- 10) {1, 4, 4}, {4, 4, 1}, {4, 1, 4} — оценки «очень высоко» по всем векторам, кроме одного со значением «1»;
- 11) {2, 2, 2} — оценки «средне» по всем векторам;
- 12) {2, 2, 3}, {2, 3, 2}, {3, 2, 2} — оценки «средне» по всем векторам, кроме одного со значением «3»;
- 13) {2, 2, 4}, {2, 4, 2}, {4, 2, 2} — оценки «средне» по всем векторам, кроме одного со значением «4»;
- 14) {2, 3, 3}, {3, 3, 2}, {3, 2, 3} — оценки «высоко» по всем векторам, кроме одного со значением «2»;
- 15) {2, 3, 4}, {3, 4, 2}, {2, 4, 3}, {3, 2, 4}, {4, 2, 3}, {4, 3, 2} — оценка по одному вектору «средне», по двум другим «высоко» и «очень высоко»;
- 16) {2, 4, 4}, {4, 4, 2}, {4, 2, 4} — оценки «очень высоко» по всем векторам, кроме одного со значением «2»;
- 17) {3, 3, 3} — оценки «высоко» по всем векторам;
- 18) {3, 3, 4}, {3, 4, 3}, {4, 3, 3} — оценки «высоко» по всем векторам, кроме одного со значением «4»;
- 19) {3, 4, 4}, {4, 4, 3}, {4, 3, 4} — оценки «очень высоко» по всем векторам, кроме одного со значением «3»;
- 20) {4, 4, 4} — оценки «очень высоко» по всем векторам.

Число классов эквивалентности $K = (n + 3) \times (n + 2)(n + 1)/6$, где n — число критериев в области. В результате получается порядковая шкала, которую можно отобразить на отрезок $[0, 1]$. В качестве агрегированного значения области ИС можно воспользоваться числом $v = (i - 1)/K \in [0, 1]$, где i — номер класса эквивалентности.

4.2. Максиминный метод

В случае с ранжированием в области «Риски» предлагается применить максиминный метод

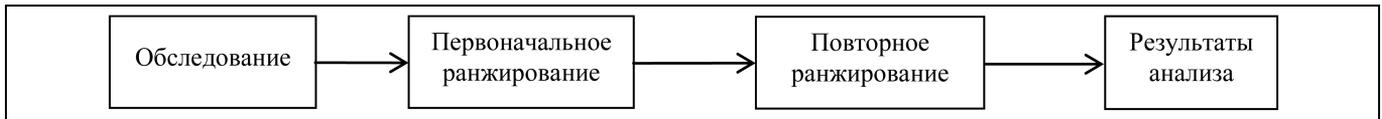


Схема общего подхода

(максиминную свертку) анализа данных [6]. Ранжирование происходит по правилу: определим матрицу S^+ , такую что $\forall x, y \in A, S^+ = \{n(x, y)\}$, где $n(x, x) \rightarrow +\infty, A$ — множество проектов, $n(x, y) = \{l | P_l(x) > P_l(y)\}, P_l(x)$ — значение варианта x по критерию l .

Иными словами, в матрице S^+ на пересечении строки x и столбца y стоит число $n(x, y)$, которое равно числу критериев альтернативы x , имеющих более высокие значения, чем альтернатива y с учетом погрешности вычислений. В данной работе альтернативе x и y соответствуют сравниваемые проекты архитектуры, а $n(x, y)$ — число критериев сравнения типов рисков.

Выберем минимальное значение в каждой строке матрицы S^+ . А затем выберем наибольшее значение из выбранных. Результирующее «максиминное» значение (т. е. группа рисков) получает максимальный ранг. Далее повторим процедуру для оставшихся групп рисков. Таким образом, правило выглядит так: x признается лучшим и выбирается тогда и только тогда, когда

$$n(x, y) = \max_{a \in A} \{ \min_{b \in A} \{n(a, b)\} \}$$

для некоторых $x, y \in A$. В случае максиминного критерия получается гарантированная нижняя оценка для всех $n(x, y)$, что рассматривается как преимущество по сравнению с методом линейной свертки.

5. ПЕРЕХОД ОТ ЧИСЛОВЫХ ОЦЕНОК К РАНГАМ

Ко всем числовым оценкам по четырем группам критериев применяем агрегирование выбранными методами: к первым трем — метод порогового агрегирования [3], а к рискам — максиминный метод. Получившиеся числовые оценки переведем в ранги по четырем группам для каждого проекта. Для перевода в ранги разделим интервал $[0, 1]$ на четыре равных части. Это позволяет сгруппировать результат ранжирования в четыре ранга:

- первый и самый низкий ранг находятся в интервале $[0; 0,25]$;
- средний ранг — в интервале $[0,25; 0,5]$;
- высокий ранг — в интервале $[0,5; 0,75]$;
- очень высокий — в интервале $[0,75; 1]$.

Рассмотрим область «Внутренняя организация ИС с СОА». В данной области выделены четыре

критерия и собраны оценки по семи проектам. После применения метода порогового агрегирования значения оценок в области приведены в табл. 2.

Для получения итогового ранжирования на уровне проекта необходимо провести процедуру агрегирования повторно на уровне областей анализа. В данном случае полученный результат соответствует только одной области «Внутренняя организация ИС с СОА». Для продолжения анализа переведем полученные оценки агрегирования в ранги. Результат показан в табл. 3.

Предложенный подход перехода от числовых значений к рангам применяется к каждой группе критериев при первом агрегировании, а затем для получения итогового ранга по проектам.

Схема подхода к ранжированию проектов показана на рисунке. Перечислим основные этапы этого подхода.

Этап «Обследование»

Шаг 1. Определение альтернатив.

Шаг 2. Анкетирование архитекторов решений:

- сбор данных по архитектуре решений;
- сбор статистики ошибок текущих систем.

Шаг 3. Оценка альтернатив по вектору критериев

Этап «Первоначальное ранжирование»

Шаг 1. Ранжирование рисков:

- категоризация рисков по пяти группам;
- ранжирование групп рисков максиминным методом.

Таблица 2

Агрегированные значения по группе критериев 1

Критерий	Номер проекта						
	1	2	3	4	5	6	7
Внутренняя организация ИС с СОА	0,06	0,62	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Таблица 3

Итоговое ранжирование по области 1

Критерий	Номер проекта						
	1	2	3	4	5	6	7
Внутренняя организация ИС с СОА	1	3	4	4	4	4	4



Шаг 2. Ранжирование проектов по группам критериев:

- внутренняя организация ИС;
- организация изменений и политик;
- готовность процессов и бизнес-сервисов;
- минимизация операционных рисков.

Этап «Повторное ранжирование»

Шаг 1. Перевод в ранги результатов первоначального ранжирования.

Шаг 2. Повторное ранжирование альтернатив методом порогового агрегирования.

Этап «Результаты анализа» — выбор проекта с наибольшим рангом как наиболее эффективного.

Предложенный подход позволяет, используя существующую статистику ошибок ИС и информацию об архитектуре реализуемого решения, получить объективную оценку работоспособности архитектуры и ее эффективности.

6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Для апробации метода выбора наиболее подходящего проекта ИС были проанализированы семь проектов архитектуры сервисов. Для каждого проекта оценивались варианты реализации ИС с СОА, его внутренняя организация и риски по предложенным критериям. Описание проанализированных проектов см. в Приложении 1.

Сбор данных по всем группам критериев, кроме рисков, осуществлялся путем опроса экспертов компании SAP, предоставивших свои оценки совместно с представителями соответствующих компаний, чьи проекты анализировались. В опросный лист были включены вопросы по предложенным критериям. Вопросы разделены на три основных раздела. В результате каждый из участвующих в сравнении проектов получил свой ранг по каждой из четырех составляющих качества ИС с СОА.

Ответы на вопросы давались в виде четырехградационных оценок (4 — «очень хорошо», 3 — «хорошо», 2 — «средне», 1 — «плохо»). Интегральное значение на уровне раздела получалось методом порогового агрегирования [3] в случае первых трех групп критериев и максимальным методом в случае с рисками. Собранные оценки в ходе анализа проектов представлены в табл. 4.

Оценки по рискам были получены не в ходе опроса, а на основе собранной статистики по рискам проектов и применения максимального метода агрегирования. Для примера рассмотрим риски первого проекта (табл. 5). Минимальные значения в каждом типе рисков выделены жирным шрифтом.

В соответствии с методом перехода от числовых оценок к рангам первый ранг получают функциональные риски для проекта 1. При ранжировании были выбраны самые высокие из минимальных оценок, что говорит о наибольшем количестве ошибок и соответственно свидетельствует о наибольшем риске соответствующего типа. В данном случае первый ранг присваивается наи-

Таблица 4

Результаты анализа архитектуры проектов

Номер	Критерий	Номер проекта						
		1	2	3	4	5	6	7
I. Внутренняя организация ИС с СОА								
1	Степень реализованности сервисной платформы	3	2	4	4	4	4	4
2	Уровень отказоустойчивости сервисов	1	3	3	3	3	3	3
3	Степень гибкости и масштабирование СОА-платформ	1	2	4	4	4	4	4
4	Готовность существующих приложений	1	2	4	4	4	4	4
II. Организация изменений и политик								
1	Степень повторного использования в архитектуре сервисов предприятия	1	2	4	2	2	2	2
2	Возможности по проектированию сервисов	1	3	3	3	3	2	3
3	Возможности по поддержке процесса предоставления сервисов	1	3	3	3	3	3	3
4	Управление изменениями поставщика сервисов	1	4	4	4	4	4	4
5	Уровень сервиса (SLA)	1	3	3	3	3	3	3
III. Готовность процессов и бизнес-сервисов								
1	Степень управления сервисами	2	2	2	2	2	2	2
2	Степень согласованности основных данных	3	4	2	4	4	2	2
3	Степень согласованности данных о транзакциях	3	2	4	3	3	4	4
4	Контроль версионности шагов процесса	1	2	2	3	3	2	2
IV. Минимизация операционных рисков								
1	Риски ввода-вывода данных	1	1	1	1	1	1	1
2	Функциональные риски	4	4	1	1	4	1	1
3	Риски связующего ПО	1	1	1	1	1	1	1
4	Риски обработки данных	2	1	1	1	1	1	1
5	Системные риски	3	4	1	1	1	1	1

большей оценке риска, так как чем больше риск, тем хуже предлагаемый проект. Поэтому в отличие от предыдущих примеров ранжирования по всем остальным критериям, в случае с рисками применяется противоположный подход ранжирования: ранг 1 присваивается самому высокому риску, ранг 4 — самому низкому. Напомним, что в случае с остальными критериями самый низкий результат агрегирования приобретал ранг 1. Результат ранжирования данных приведен в табл. 5. Остальные оценки по оставшимся шести проектам группы «Минимизация операционных рисков» были получены по тому же принципу.

Следующий шаг — применение метода порогового агрегирования к оценкам, приведенным в табл. 5. В результате получим агрегированное значение по четырем областям или группам критериев для каждого проекта (табл. 6). Затем переведем в ранги получившиеся значения, воспользовавшись предложенным подходом перехода от чисел к рангам (табл. 7).

Полученное ранжирование по группам позволяет провести повторное агрегирование и ранжирование оценок проектов (табл. 8). Итоговое ранжирование осуществляется уже исходя из семи рангов, соответствующих оценкам по семи проектам.

Таблица 5

Риски проекта 1

Типы рисков	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий	Ранг
Риски ввода—вывода данных	1	44	140	1	4
Функциональные риски	19	463	1251	12	1
Риски связующего ПО	1	25	82	1	4
Риски обработки данных	4	170	509	6	3
Системные риски	9	128	283	7	2

Таблица 6

Результаты порогового агрегирования по группам

Номер	Критерий	Номер проекта						
		1	2	3	4	5	6	7
I	Внутренняя организация ИС с СОА	0,06	0,62	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
II	Организация изменений и политик	0	0,84	0,95	0,84	0,84	0,76	0,84
III	Готовность процессов и бизнес-сервисов	0,38	0,65	0,64	0,79	0,79	0,64	0,64
IV	Минимизация операционных рисков	0,25	0,16	0	0	0,05	0	0

Таблица 7

Результаты ранжирования

Номер	Критерий	Номер проекта						
		1	2	3	4	5	6	7
I	Внутренняя организация ИС с СОА	1	3	4	4	4	4	4
II	Организация изменений и политик	1	4	4	4	4	4	4
III	Готовность процессов и бизнес-сервисов	1	3	3	4	4	3	3
IV	Минимизация операционных рисков	4	3	1	1	2	1	1

Таблица 8

Итоговое агрегирование и ранжирование

Критерий	Номер проекта						
	1	2	3	4	5	6	7
Агрегированная оценка	0,08	0,91	0,53	0,56	0,82	0,53	0,53
Итоговый ранг	1	7	4	4	6	4	4

Анализ (см. табл. 8) показал, что проект 2 самый эффективный. Данный проект с учетом взвешенного анализа характеристик системы, внутренней организации и возможных рисков является наиболее выгодным. Кроме того, он больше всех соответствует концепции СОА. На втором месте проект 5, на третьем — проекты 3, 4, 6 и 7, а на последнем — проект 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет осуществить выбор проекта реализации ИС с сервис-ориентированной архитектурой в зависимости от оценок по совокупности критериев в четырех основных областях: внутренняя организация ИС с сервис-ориентированной архитектурой; организация изменений и политик; готовность процессов и бизнес-сервисов; минимизация операционных рисков. Оценка в последней из перечисленных областей определяется в соответствии со статистикой по проектам. Задача выбора оптимального проекта анализировалась с помощью метода порогового агрегирования. Для этого сформулированы ранговые критерии качества сервис-ориентированной архитектуры. Сначала анализ проводится по критериям в каждой из четырех областей, а затем повторно для получения итоговой взвешенной оценки.

Предложенный метод обладает свойством «некомпенсируемости» для любого критерия с низкой оценкой. Результат ранжирования дает четкую картину приоритетности и эффективности проектов по заданным критериям.

Автор благодарен профессору Ф.Т. Алескерову за постановку задачи.



ЛИТЕРАТУРА

1. Дубова Н. SOA: подходы к реализации. Менеджмент ИТ // Открытые системы. — 2004. — № 6. — URL: <http://www.osp.ru/os/2004/06/184450/> (дата обращения 27.06.2012).
2. Черняк Л. Говорим SOA, подразумеваем EA // Открытые системы. — 2005. — № 4. — URL: http://www.osp.ru/os/2005/04/185518/_p3.html (дата обращения 27.06.2012).
3. Aleskerov F. T., Chistyakov V. V., Kalyagin V. A. Multiple criteria threshold decision making algorithms: Working paper WP7/2010/02. — М.: State University — Higher School of Economics, 2010. — 40 p.
4. Алескеров Ф.Т., Якуба В.И. Метод порогового агрегирования трехградационных ранжировок // Доклады академии наук. — 2007. — Т. 413, № 2. — С. 181–183.
5. Пырлина И.В. Классификация операционных рисков при сервисно-ориентированном подходе к созданию информационной системы // Бизнес-Информатика. — 2011. — № 4 (18). — С. 54–61.
6. Aleskerov F., Ersel H., Yolalan R. Multicriterial Ranking Approach for Evaluating Bank Branch Performance // Intern. Journal of Information Technology & Decision Making. — 2004. — Vol. 3, N 2. — P. 321–335.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Описание проектов

Проект 1. Нефтегазовая компания	
Описание проекта	Проектирование корпоративных приложений с COA. Создание четырех композитных приложений с использованием девяти корпоративных сервисов в рамках одного выбранного процесса
Описание архитектуры решения	Создание единой системы согласования запросов на приобретение дорогих товаров (с использованием четырех композитных процессов и девяти сервисов). Система использует элементы процессов, существующих в ландшафте предприятия систем mySAP Enterprise Resource Planning (ERP), Supply Relationship Management (SRM). С помощью интеграционной шины данных SAP NetWeaver данные передаются в перечисленные системы. В качестве интерфейса пользователя используется корпоративный портал, для ведения основных данных используется решение SAP NetWeaver Master Data Management (MDM)
Организационное обеспечение	Назначение владельцев процессов, создание организационной структуры для поддержания COA (владельцы процессов, архитектор COA, бизнес-аналитик, разработчик сервисов, интеграционный эксперт)
Проект 2. Нефтегазовая компания	
Описание проекта	Внедрение решения «транспорт — менеджер», реализующего композитный процесс подачи заявки на автотранспорт на базе сервисного подхода на интеграционной платформе
Описание архитектуры	Создание композитного приложения на базе платформы SAP NetWeaver в целях взаимосвязи производственных и контроллинговых системах текущего ИТ-ландшафта (ИС-АТ, ГИС, SAP-системы), обеспечения создания приложений на основе бизнес-процессов и усовершенствования процессов транспортного управления
Организационное обеспечение	Ввод новых ролей в организационной структуре ИТ
Проект 3. Банковская компания	
Описание проекта	Создание фронтального решения, обеспечивающего «единое окно продаж», интеграцию каналов взаимодействия с клиентом, организацию и управление работой единой клиентской базой, а также возможность гибкой перестройки данных функций в зависимости от появления новых бизнес-требований, новых продуктов или каналов продаж
Описание архитектуры	Основная задача системы — интегрировать учетные системы, системы SAP R/3 и «не-SAP системы» («Сфера», 1С, «Lotus»), чтобы обеспечить работу в режиме реального времени специалистов. Композитное приложение обеспечивает: <ul style="list-style-type: none"> — единый интерфейс пользователя, ориентированный на совместную работу (Web-интерфейс); — единое ведение основных данных; — независимость реализуемого процесса от специфики реализации бизнес-сервисов
Организационное обеспечение	Нет
Проект 4. Нефтегазовая компания	
Описание проекта	Создание информационно-технического комплекса, решающего весь спектр задач, связанных с ведением и использованием данных в компании. В решении предусмотрена возможность интеграции различных информационных систем (ERP, учетных, производственных) на уровне данных, реализована функция разграничения прав доступа к информации

Описание архитектуры	Создание Единой системы нормативно-справочной информации на платформе SAP MDM с поэтапной организацией информационно-технологического ландшафта и централизованного хранилища данных, включающего в себя все основные справочники и классификаторы корпоративных прикладных систем (ERP-класса, учетных и производственных). Большое значение придается созданию базовой аппаратно-программной интеграционной инфраструктуры на основе SAP NetWeaver
Организационное обеспечение	Ввод новых ролей в организационной структуре ИТ и соответствующих бизнес-подразделений
Проект 5. Нефтегазовая компания	
Описание проекта	Для эффективной работы корпоративных информационных систем, взаимодействия всех справочников и баз данных компании реализуется интеграция используемых локальных информационных систем по средствам единой технологической платформы с помощью сервисного подхода. Создание удобного механизма работы с информацией, независимо от средств существующих локальных систем
Описание архитектуры	Обеспечение оптимальной интеграции существующих решений SAP с локальными информационными системами средствами интеграционной платформы SAP NetWeaver. Решение предусматривает организацию работы с критическими стандартами Microsoft.NET и J2EE для интеграции современных бизнес-приложений
Организационное обеспечение	Ввод новых ролей в организационной структуре ИТ и соответствующих бизнес-подразделений
Проект 6. Нефтегазовая компания	
Описание проекта	В проекте осуществляется интеграция системы класса ERP и нефтегазовой системы OIS для реализации прозрачных бизнес-процессов с возможностью использования данных из нескольких систем. В частности, реализуемый процесс призван отразить фактические показатели выполнения мероприятия с помощью стандартных документов системы класса ERP на основании акта выполненных работ из подсистемы OIS «Ремонты»
Описание архитектуры	Реализуется средство интеграции систем OIS и R/3, которое выполняет следующие функции: <ul style="list-style-type: none">— поддерживает существующие протоколы и форматы передачи данных;— обеспечивает подключение новых систем к существующей инфраструктуре без нарушения ее работы;— гарантирует доставку информации от отправителя к получателю, предоставляет инструменты мониторинга и администрирования потоков данных;— эффективно использует имеющиеся каналы связи, при необходимости использовать резервные способы доставки информации
Организационное обеспечение	Нет
Проект 7. Банковская компания	
Описание проекта	Основная задача проекта — решение проблем интеграции учетных систем, системы ERP и другие системы («Сфера», 1С, «Lotus», TIBCO BW) для обеспечения бухгалтерского учета, контроля ресурсов и управления сквозными бизнес-процессами, использующими данные из различных систем
Описание архитектуры	Реализуется средство интеграции систем SAP R/3 и «не-SAP систем», которое выполняет следующие функции: <ul style="list-style-type: none">— поддерживает существующие протоколы и форматы передачи данных;— обеспечивает подключение новых систем к существующей инфраструктуре без нарушения ее работы;— обеспечивает интеграцию проектов на организационном, информационном и технологическом уровнях;— обеспечивает встраивание новых бизнес-процессов в существующую среду бизнес-процессов корпорации
Организационное обеспечение	Нет

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

Пырлина Ирина Владимировна — эксперт по ИТ-архитектуре, Компания SAP, г. Москва, ✉ Irina.pyrlina@sap.com.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

В.Д. Елисеев, Е.Д. Ключев, К.В. Петрин, Е.Д. Теряев

Показана возможность повышения качества директорного управления динамическим объектом благодаря использованию дополнительной информации об отклонении штурвала.

Ключевые слова: директорное управление, штурвал, человек-оператор, самолет.

ВВЕДЕНИЕ

Директорное управление (ДУ) относится к полуавтоматическому управлению, при котором командный сигнал, формируемый вычислителем на основе информации о заданном и текущем состояниях объекта, вызывает отклонение подвижной планки на директорном приборе (ДП) или марки на экранном индикаторе. Задача человека-оператора состоит в том, чтобы в процессе ручного управления свести это отклонение к нулю или к заданному значению [1–4]. В литературе по ДУ используются различные названия подвижного элемента ДП. В настоящей статье термины употребляются в соответствии с работой [4].

В авиации директорное управление применяется, как правило, при выводе самолета на заданную высоту, полете по маршруту, при заходе на посадку [4].

Обычно рекомендуется отклонять штурвал пропорционально смещению планки, т. е. летчик должен позиционировать штурвал без использования информации об ошибке отклонения от его требуемого положения [1, 2]. Однако такое позиционирование является наиболее сложным и приводит к большим ошибкам, напряженной работе летчика и возможной раскачке самолета [3].

Цель статьи заключается в исследовании возможности повышения качества ДУ благодаря использованию информации об отклонении штурвала. Повышение качества предполагает повышение точности управления, облегчение действий человека-оператора и уменьшение времени на его предварительную подготовку и приобретение опыта.

Директорное управление осуществлялось человеком-оператором на полунатурном стенде с реальным штурвалом и двумя компьютерами для моделирования движения самолета и визуализации отклонения планки без имитации инерционности датчиков и шумов измерений. Модели датчиков принимались идеальными, так как полоса пропускания каждого датчика значительно шире полосы пропускания контура управления. Влияние погрешностей датчиков на ДУ требует специального исследования. В рассматриваемых далее примерах помехозащищенность ДУ самолетом повышается благодаря исключению сигнала перегрузки, подаваемого на ДП. Информация об отклонении штурвала получалась с помощью потенциометрического датчика с присущими ему погрешностями.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ САМОЛЕТА

При ДУ нормальной перегрузкой (рис. 1) повышение качества процессов отслеживания оператором заданных значений перегрузки может быть достигнуто путем использования информации о размере отклонения штурвала X_p . Для этого сигнал датчика отклонения штурвала D_x , несущий эту информацию, подается на ДП (рис. 2) [5]. В данном случае не требуется сигнал ошибки $(n_c - n_y)$, если коэффициент обратной связи $K_{n/x}$ по сигналу датчика D_x равен коэффициенту передачи СШУ. Это условие выполняется, когда СШУ астатическая [6] и в ней используется сигнал перегрузки [7].

При этом оператору надо выполнить наиболее простую для него задачу позиционирования штурвала [8]. Длительность переходного процесса по

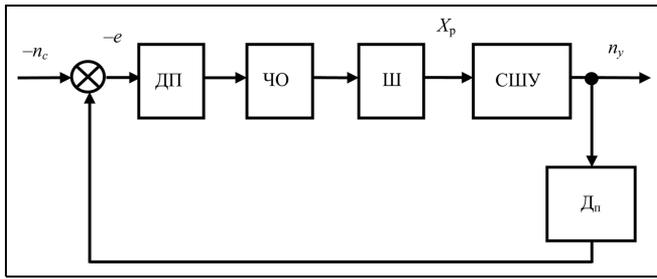


Рис. 1. Схема директорного управления нормальной перегрузкой самолета: n_c — заданное значение нормальной перегрузки; n_y — нормальная перегрузка самолета; ДП — директорный прибор; ЧО — человек-оператор (летчик); Ш — штурвал; $e = (n_c - n_y)$ — сигнал ошибки, вызывающий пропорциональное смещение планки на ДП; X_p — отклонение штурвала (ручки); Д_н — датчик отклонения штурвала; СШУ — система штурвального управления нормальной перегрузкой, включающая в себя объект управления по перегрузке; Д_п — датчик перегрузки

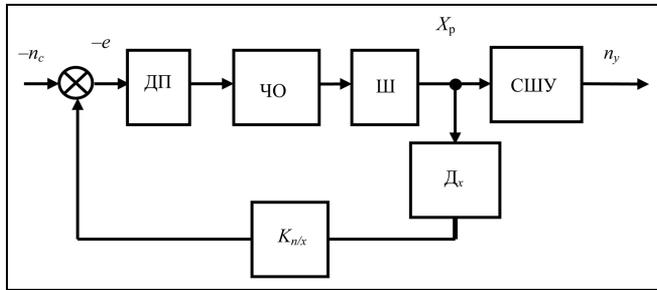


Рис. 2. Схема директорного управления нормальной перегрузкой с учетом информации о сигнале отклонения штурвала

перегрузке будет определяться длительностью выполнения этой задачи и длительностью реакции СШУ на отклонение штурвала. Алгоритм действий оператора таков, что он, отклоняя штурвал, ставит хорошо управляемую планку в нулевое положение и сохраняет положение штурвала, если заданное значение перегрузки постоянно. Если заданное значение перегрузки n_c переменное, то планка будет перемещаться, и оператору надо возвращать ее в нулевое положение отклонением штурвала.

Примеры переходных процессов отслеживания оператором при полунатурном моделировании заданных ступенчатых различных по амплитуде и знаку значений перегрузки n_c согласно схемам, представленным на рис. 1 и 2, приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Показаны переходные процессы по перегрузке n_y , по отклонению штурвала X_p , по ошибке e на протяжении 100 с. Значения n_c и n_y регистрировались с масштабными коэффициентами, равными 1, отклонения штурвала X_p — с коэффициентом 0,2 и ошибки e — с коэффициентом 2,5.

Передаточная функция СШУ нормальной перегрузкой n_y принималась в виде

$$W_{n/x}(s) = -0,8/(s^2 + 8s + 8). \quad (1)$$

Это линейное звено второго порядка приближенно аппроксимирует динамику спроектированной астатической СШУ, удовлетворяющей тактико-техническим требованиям. Для установления факта влияния инерционности СШУ на качество ДУ высокая точность аппроксимации не требуется.

Сравнение процессов, представленных на рис. 3 и 4, где коэффициенты передачи СШУ и $K_{n/x}$ рав-

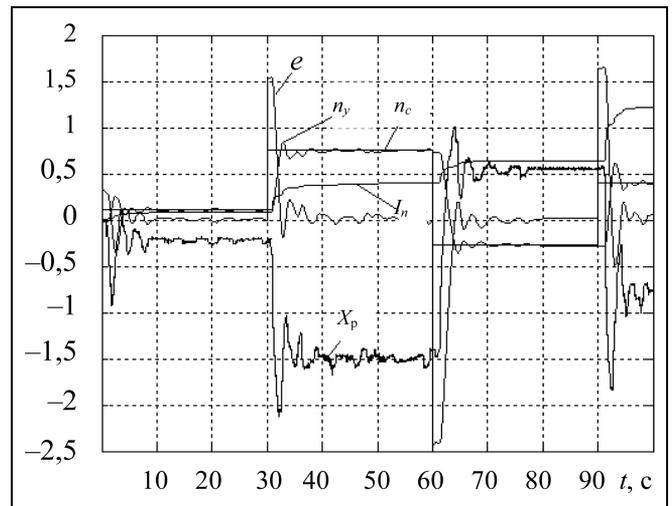


Рис. 3. Переходные процессы директорного управления нормальной перегрузкой; $e = n_c - n_y$

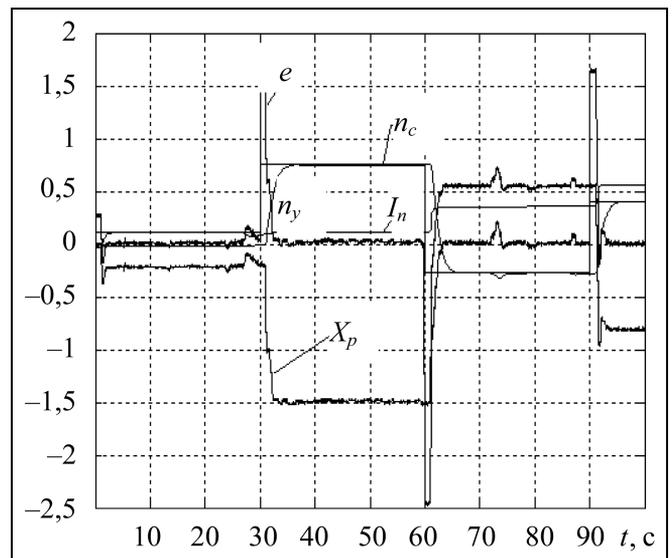


Рис. 4. Переходные процессы директорного управления нормальной перегрузкой; $e = n_c + X_p K_{n/x}$



ны ($K_{n/x} = -0,1$) согласно формуле (1), показывает, что при использовании сигнала X_p датчика отклонения штурвала процессы по ошибке e , перемещению X_p и перегрузке n_y плавные. Это объясняется тем, что контур управления, где присутствует человек-оператор, не содержит инерционную СШУ, и для оператора управление перемещением планки становится более легким и планка легко управляема. Отметим, что вместо сигнала отклонения штурвала можно использовать сигнал усилия на штурвале.

Облегчение действий человека-оператора при использовании сигнала отклонения штурвала может быть оценено с помощью интегральной квадратичной оценки скорости перемещения штурвала. Графики изменений интеграла от квадрата скорости перемещения штурвала на рис. 3 и 4 и обозначены через I_n . Значение скорости перемещения штурвала определялось с помощью дифференцирующего устройства с передаточной функцией вида $W(s) = s/(0,1s + 1)$ и регистрировалось с масштабным коэффициентом 0,05.

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что интегральная оценка в последнем случае примерно в два раза меньше. Это свидетельствует о меньшей напряженности в работе оператора при использовании сигнала отклонения штурвала вместо сигнала перегрузки.

Таким образом, стендовое исследование ДУ нормальной перегрузкой самолета показало возможность облегчения действий оператора (летчика) при введении сигнала отклонения штурвала в командный сигнал, подаваемый на ДП вместо сигнала перегрузки.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ САМОЛЕТА

Директорное управление вертикальной скоростью самолета по сравнению с ДУ нормальной перегрузкой существенно усложняется, поскольку тракт «отклонение штурвала — вертикальная ско-

рость содержит, кроме СШУ, еще и интегрирующее звено, и его передаточная функция имеет вид $W_{V_y/x}(s) = W_{n/x}(s)g/s$, где g — ускорение свободного падения, V_y — вертикальная скорость.

При ДУ вертикальной скоростью только по сигналу ошибки ($V_c - V_y$), где V_c — заданное значение вертикальной скорости, действия оператора сводятся к отклонению штурвала пропорционально этому командному сигналу [1—3]. Сложность обеспечения требуемой пропорциональности между перемещением планки ДП и отклонением штурвала отмечалась нами ранее.

В связи с недостатками ДУ только по сигналу ошибки далее будем также рассматривать и сравнивать варианты формирования командного сигнала с использованием дополнительной информации в виде сигнала нормальной перегрузки [4] или сигнала отклонения штурвала, как это делалось при управлении нормальной перегрузкой в § 1.

На рис. 5 представлена схема директорного управления вертикальной скоростью, на которой показаны дополнительные связи, которые могут облегчить процесс управления. Значение командного сигнала формируется в трех видах:

$$e = (V_c - V_y); \quad (2)$$

$$e = (V_c - V_y) - (1/K_v)n_y; \quad (3)$$

$$e = (V_c - V_y) - (K_{n/x}/K_v)X_p. \quad (4)$$

При нейтральном положении ключа реализуется сигнал вида (2), при нижнем — вида (3), при верхнем — вида (4). Предполагается, что передаточная функция датчика D_v вертикальной скорости V_y равна единице.

Из схемы (см. рис. 5) и формулы (3) видно, что оператору при дополнительном использовании обратной связи по перегрузке необходимо отслеживать переменное заданное значение нормальной перегрузки в виде $n_c = (V_c - V_y) K_v$, которое формируется во внешнем контуре. В этом случае во внутреннем контуре с обратной связью по перегрузке будет отсутствовать интегрирующее звено

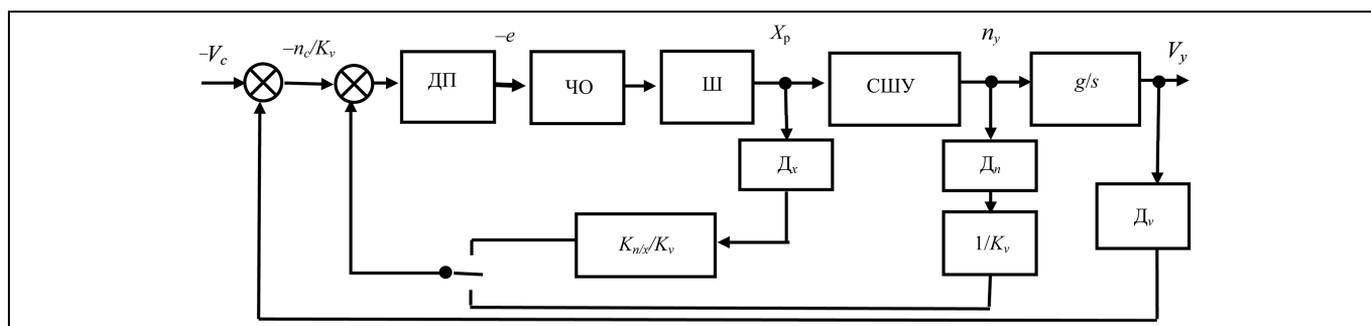


Рис. 5. Схема директорного управления вертикальной скоростью

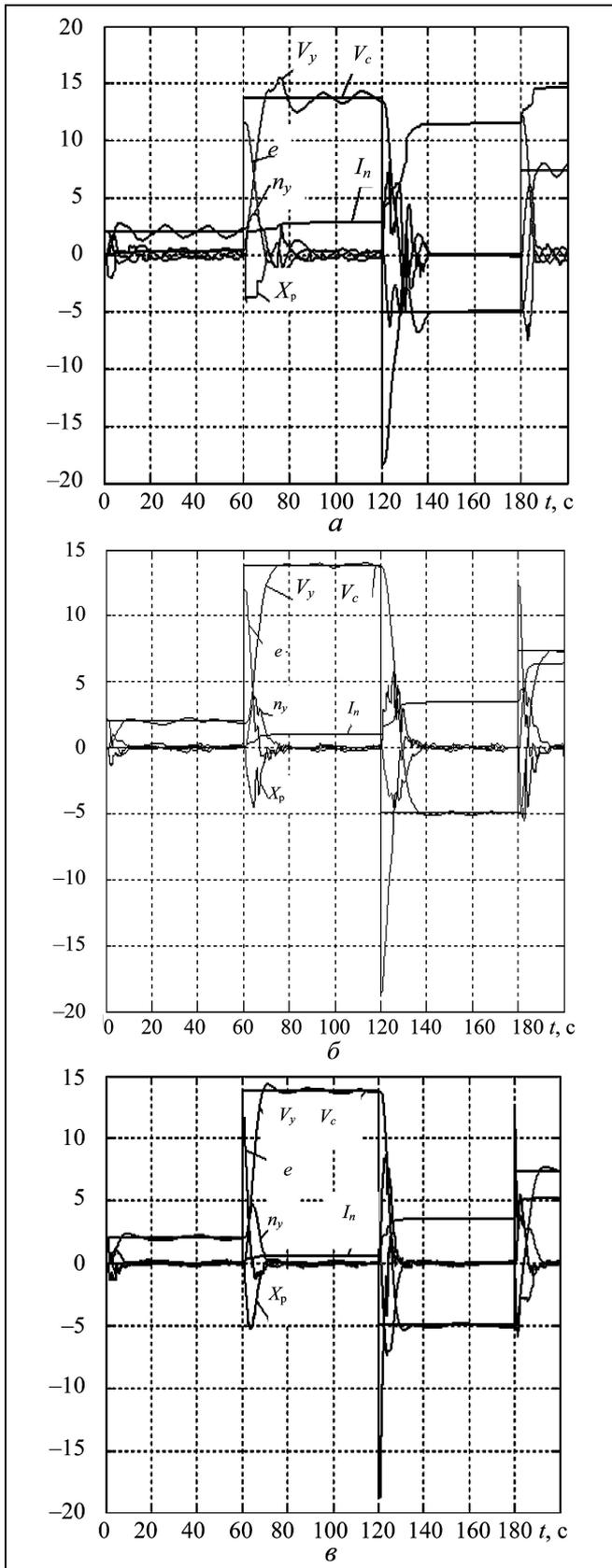


Рис. 6. Переходные процессы ДУ вертикальной скоростью; командный сигнал: а — вида (2); б — вида (3); в — вида (4)

объекта, что существенно облегчает работу оператора. Таким образом, задача сводится к более простой задаче отслеживания заданного значения перегрузки.

На рис. 6 приведены примеры процессов изменения вертикальной скорости V_y , ошибки e , нормальной перегрузки n_y , отклонения штурвала X_p и интегральной оценки I_n в соответствии с алгоритмами (2)–(4). Оператор отслеживает ступенчатые различные по амплитуде и знаку значения заданной вертикальной скорости V_c при отсутствии дополнительных сигналов (см. рис. 6, а), при использовании только дополнительного сигнала текущей перегрузки, подаваемого на ДП (см. рис. 6, б) с коэффициентом $K_v = 1/30$, при использовании дополнительного сигнала отклонения штурвала X_p , подаваемого на ДП с коэффициентом $K_{n/x}/K_v$ (см. рис. 6, в). Значения V_y , V_c , X_p и e регистрировались с коэффициентами, равными 1, n_y — с коэффициентом 9,8, а I_n — с коэффициентом 0,01.

При управлении только по сигналу ошибки (см. рис. 6, а) планка трудно управляема, так как отклонение штурвала опосредованно влияет на ее положение (через интеграл), что приводит к наибольшим ошибкам.

Как следует из сравнения процессов, представленных на рис. 6, а и б, использование дополнительного сигнала перегрузки в соответствии с формулой (3) приводит к существенному повышению точности отслеживания заданных значений вертикальной скорости. При этом интегральная оценка I_n квадрата скорости отклонения штурвала становится примерно в два раза меньше, что свидетельствует о снижении напряженности действий оператора и совпадает с оценкой самого оператора.

Исследования показали, что более высокое качество отслеживания заданных значений вертикальной скорости получается при использовании дополнительного сигнала отклонения штурвала (см. рис. 6, в) в соответствии с выражением (4). Алгоритм действий оператора становится наиболее простым и заключается в приведении планки на экране ДП в нулевое положение и удержании ее в этом положении. Следует иметь в виду, что она стремится смещаться при уменьшении разности $(V_c - V_y)$, которая входит как составляющая в сигнал, подаваемый на ДП.

На рис. 6, в приведена интегральная оценка I_n квадрата скорости перемещения штурвала, показывающая, что при использовании сигнала отклонения штурвала эта оценка уменьшается примерно на 30 % по сравнению с интегральной оценкой (см. рис. 6, б), когда использовался сигнал пере-



грузки. При этом процессы отслеживания вертикальной скорости менее длительные на 20–25 % при вхождении в 5 %-ю трубку.

Таким образом, исследование процессов ДУ вертикальной скоростью самолета показывает, что использование сигнала отклонения штурвала совместно с сигналом ошибки между заданной и текущей вертикальной скоростью позволяет ускорить переходные процессы и облегчить оператору процесс управления.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТОЙ ПОЛЕТА САМОЛЕТА

Директорное управление высотой полета только по сигналу ошибки между заданным и текущим ее значениями создает для оператора чрезвычайно большие трудности, при приведении планки в нулевое положение [9]. Это связано с тем, что в тракт «отклонение штурвала — высота полета» входит, кроме СШУ, еще и два интегрирующих звена, и его передаточная функция имеет вид $W_{H/x}(s) = W_{n/x}(s)g/s^2$.

Для повышения точности и облегчения действий оператора как обычно необходимо учитывать вертикальную скорость, что позволяет свести задачу ДУ высотой к задаче отслеживания заданной переменной вертикальной скорости.

Для этого сформируем заданное значение вертикальной скорости V_c пропорционально ошибке между сигналами заданного значения высоты H_c и ее текущего значения H с коэффициентом пропорциональности K_H :

$$V_c = K_H(H_c - H). \quad (5)$$

Схема ДУ высотой полета приведена на рис. 7, которая содержит в качестве подсхемы схему ДУ вертикальной скоростью (см. рис. 5) по заданному значению V_c согласно формуле (5). Коэффициент

усиления сигнала ошибки по высоте K_H в полунатурных исследованиях был выбран равным 0,15.

На рис. 8 представлены примеры процессов ДУ при отслеживании оператором различных по амплитуде и знаку заданных значений высоты H_c в соответствии со схемой (см. рис. 7), когда не используются дополнительные сигналы (ключ в нейтральном положении) и когда используются отдельно сигнал n_y (ключ в нижнем положении) и сигнал X_p (ключ в верхнем положении). Показаны изменения текущей высоты H , вертикальной скорости V_y , нормальной перегрузки n_y , отклонения штурвала X_p и интегральной оценки скорости перемещения штурвала I_n .

Значения H_c и H регистрировались с коэффициентами 1, X_p — с коэффициентом 4, n_y — с коэффициентом 19,6, e — с коэффициентом 2, V_y — с коэффициентом 2 и I_n — с коэффициентом 0,01.

Сравнение процессов, представленных на рис. 8, показывает, что, как и в § 1 и 2, использование сигналов перегрузки и отклонения штурвала резко меняет качество управления, так как дает более быстрые и плавные процессы ДУ и существенно облегчает действия оператора. В частности, управление с использованием сигнала перегрузки уменьшает интегральную оценку I_n приблизительно в два раза по отношению к управлению, когда дополнительный сигнал не используется.

Процессы, представленные на рис. 8, в, показывают уменьшение длительности переходных процессов ДУ высотой полета при использовании сигнала отклонения штурвала вместо сигнала перегрузки примерно на 15–20 %, а также облегчение действий оператора, что следует из уменьшения интегральной оценки скорости отклонения штурвала I_n примерно в 3 раза по сравнению со случаем использования сигнала перегрузки.

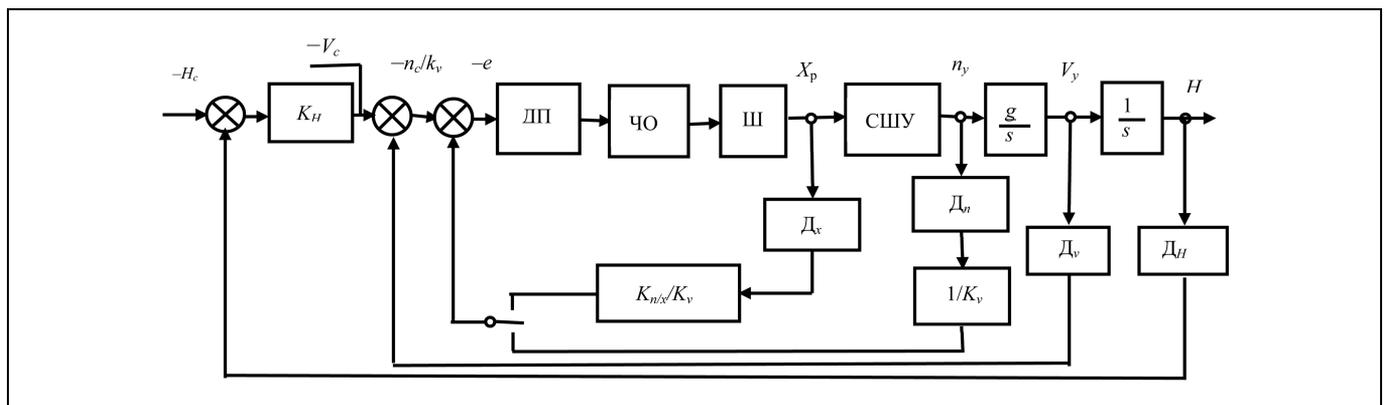


Рис. 7. Схема директорного управления высотой полета

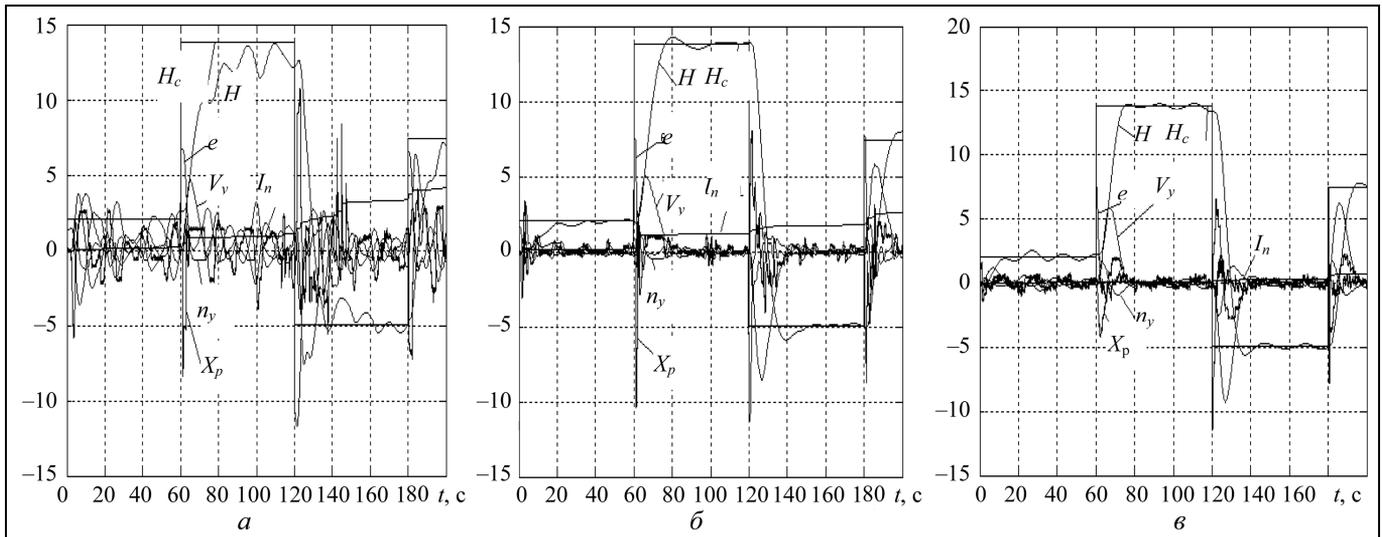


Рис. 8. Переходные процессы ДУ высотой: а — сигнал $e = (H_c - H)0,15 - V_y$; б — сигнал $e = (H_c - H)0,15 - V_y - Kn_y(K = 30)$; в — сигнал $e = (H_c - H)0,15 - V_y + KX_p(K = 3)$

Таким образом, исследование процессов ДУ высотой полета самолета показывает, что дополнительное использование сигналов перегрузки и отклонения штурвала помимо сигнала ошибки между заданной и текущей высотой полета и сигнала вертикальной скорости, позволяет ускорить переходные процессы и одновременно облегчить оператору процесс управления. Использование сигнала отклонения штурвала дает более высокое качество процессов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено, что:

— динамическое качество директорного управления динамическим объектом может быть повышено при дополнительном использовании сигналов отклонений штурвала;

— директорное управление сложным динамическим объектом с сигналом отклонения штурвала сводится к простой задаче позиционирования штурвала;

— при директорном управлении нормальной перегрузкой, вертикальной скоростью и высотой полета самолета целесообразно использовать в командном сигнале вместо сигнала текущей перегрузки сигнал отклонения штурвала. При этом сигнал перегрузки необходим лишь для обеспечения астатизма системы штурвального управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. — М.: Наука, 1973. — 560 с.

2. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чукулаев М.С. Системы автоматической посадки. — М.: Машиностроение, 1975. — 216 с.
3. Практическая аэродинамика маневренных самолетов. Учебник для летного состава / Под ред. Н.М. Лысенко. — М.: Воениздат, 1977. — 439 с.
4. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов / Под ред. М.М. Сильвестрова. — М.: Филиал Воениздата, 2007. — 510 с.
5. Елисеев В.Д., Похваленский В.Л., Клюев Е.Д. О способах директорного управления динамическим объектом // Тр. XVIII междунар. науч.-техн. семинара. «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», сентябрь 2009 г., г. Алушта. — М., 2009.
6. Елисеев В.Д., Клюев Е.Д. Директорное управление продольным движением самолета с астатической системой управления нормальной перегрузкой // Тр. XIX междунар. науч. техн. семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», сентябрь 2010 г., г. Алушта. — М., 2010. — С. 173–174.
7. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чукулаев М.С. Системы автоматического управления самолетом. — М.: Машиностроение, 1987. — 240 с.
8. Разработка и исследование модели действий летчика при позиционировании ручки управления самолетом / Ю.Г. Оболенский и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2004. — № 5. — С. 70–77.
9. Микоян С.А., Корбут А.Г. Заход на посадку по приборам. — М.: Воен. изд-во Минобороны СССР, 1979. — 80 с.

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

Елисеев Валерий Дмитриевич — канд. техн. наук, науч. сотрудник, ✉ k301ter@mai.ru,

Клюев Евгений Дмитриевич — науч. сотрудник,

Петрин Константин Васильевич — ст. науч. сотрудник, ✉ kpetrin@yandex.ru,

Тряев Евгений Дмитриевич — чл.-корр. РАН, гл. науч. сотрудник,

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва.

ЕЩЕ РАЗ О НЕКОРРЕКТНОСТИ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

В.В. Подиновский, О.В. Подиновская

В опубликованной в журнале «Проблемы управления» статье авторов содержится пример двухкритериальной задачи, показывающий, что применение метода анализа иерархий (МАИ) может привести к явно неверным результатам. Однако в опубликованной в этом же журнале, № 3, 2012, статье утверждается, что в ней указано на «ошибку авторов статьи при использовании средств МАИ, в силу чего утверждение о несостоятельности МАИ, основанное на рассматриваемой задаче, неправомерно». В данной работе показано, что средства при решении контрпримера были применены без нарушения рекомендаций МАИ, а также приведены еще два контрпримера, подтверждающие выводы авторов.

Ключевые слова: принятие многокритериальных решений, метод анализа иерархий, дескриптивный и нормативный подходы, шкала отношений, приоритеты вариантов, теория измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно методу анализа иерархий — МАИ (the analytic hierarchy process — АНР) сравнение вариантов по предпочтительности относительно каждого из критериев следует производить по шкале отношений, а нормализацию приоритетов вариантов по отдельным критериям осуществлять вне связи с приоритетами (оценками важности) критериев [1, 2]. Известно, однако, что такая техника расчетов, предполагающая применение аддитивных функций ценности, согласно математической теории измерений неправомерна [3, 4] (в работе [5] применение подобной нормализации было названо «интеллектуальной ошибкой»). И уже только по этой причине следует признать, что МАИ не может считаться корректным методом. И строить контрпримеры для доказательства справедливости такой научной оценки метода не требуется.

В статье [6] был приведен иллюстративный пример двухкритериальной задачи, который наглядно показал, что применение МАИ «из-за недостатков в теоретической базе метода может привести к явно неверным результатам». При решении этой задачи был применен самый известный и самый распространенный подход МАИ, именуемый дескриптивным. Однако автор статьи [7] утверждает, что для решения этой задачи нужно было применять не дескриптивный, а нормативный подход, который при решении этой задачи не приводит к неверным результатам.

В настоящей работе выясняется, что для применения дескриптивного подхода к решению ука-

занной задачи «противопоказаний» нет. Приводятся два иллюстративных примера задач, при решении которых и нормативный подход приводит к ошибочным результатам.

1. ПРИМЕР 1

Для удобства дальнейшего изложения вначале приведем в кратком изложении двухкритериальную задачу из статьи [6] и результаты ее решения. Имеются четыре варианта (альтернативы): x^1, x^2, x^3 и x^4 , оцениваемые по двум критериям f_1 и f_2 равной важности. Критерии имеют общую шкалу с градациями: e — отлично (*excellent*), g — хорошо (*good*), m — посредственно (*mediocre*). Варианты x^j характеризуются следующими векторными оценками $f(x^j) = (f_1(x^j), f_2(x^j))$:

$$f(x^1) = (e, g); f(x^2) = (m, e); f(x^3) = (g, g); f(x^4) = (e, m).$$

Требуется ранжировать (упорядочить) варианты по предпочтительности.

Из интуитивных соображений ясно, что варианты x^2 и x^4 одинаковы по предпочтительности (ввиду «абсолютной симметрии этих вариантов в рассматриваемой задаче» [7]), а наилучшим следует считать вариант x^1 .

В результате решения задачи при помощи теории важности критериев — ТВК [8] в статье [6] была получена следующая частичная упорядоченность вариантов: наилучшим является вариант x^1 ; варианты x^2 и x^4 одинаковы по предпочтительности; вариант x^3 несравним по предпочтительности ни с x^2 , ни с x^4 . Эта упорядоченность согласована с высказанными выше интуитивными ожиданиями. И решения задачи при помощи ТВК было проведено в статье [6] для того, чтобы показать: интуи-

тивные соображения об ожидаемых результатах решения задачи можно обосновать при помощи корректного ее анализа. Тот факт, что полученная упорядоченность вариантов лишь частичная — естественное следствие того, что шкала критериев считалась порядковой: при совершенствовании шкалы за счет дополнительной информации о предпочтениях эта упорядоченность может быть продолжена до полной. Легко убедиться в справедливости следующих утверждений [8]: 1) если рост предпочтений вдоль шкалы критериев замедляется, то вариант x^3 предпочтительнее каждого из вариантов x^2 и x^4 ; 2) если рост предпочтений вдоль шкалы критериев ускоряется, то каждый из вариантов x^2 и x^4 предпочтительнее варианта x^3 ; 3) при равномерном росте предпочтений вдоль шкалы критериев все три варианта x^2 , x^3 и x^4 одинаковы по предпочтительности. Подчеркнем, что для получения последних результатов достаточно оказалось лишь качественной информации о предпочтениях.

Теперь обратимся к решению задачи при помощи МАИ, проведенному в статье [6]. Пусть, в соответствии с допущением МАИ об измерении предпочтений в шкале отношений, $a > 1$ — степень превосходства в предпочтительности шкальной оценки e над оценкой g , и $b > 1$ — степень превосходства в предпочтительности шкальной оценки g над оценкой m . Степень превосходства оценки e над оценкой m равна ab . Исходя из согласованных матриц парных сравнений вариантов по предпочтительности относительно первого и второго критериев, построенных согласно указанным данным о соотношении градаций шкалы по предпочтительности, были получены векторы приоритетов вариантов [6]:

$$\begin{aligned} & (p_1(x^1), p_1(x^2), p_1(x^3), p_1(x^4)) = \\ & = \left(\frac{ab}{2ab+b+1}, \frac{1}{2ab+b+1}, \frac{b}{2ab+b+1}, \frac{ab}{2ab+b+1} \right); \\ & (p_2(x^1), p_2(x^2), p_2(x^3), p_2(x^4)) = \\ & = \left(\frac{b}{ab+2b+1}, \frac{ab}{ab+2b+1}, \frac{b}{ab+2b+1}, \frac{1}{ab+2b+1} \right), \end{aligned}$$

где $p_i(x^j)$ — приоритет варианта x^j по критерию f_i .

Варианты x^j сравниваются по предпочтительности согласно величинам их интегральных, или глобальных приоритетов

$$h(x^j) = w_1 p_1(x^j) + w_2 p_2(x^j),$$

где w_1 и w_2 — приоритеты критериев относительно цели. В нашей задаче критерии равноважны, и поэтому $w_1 = w_2 = 1/2$.

Разность $h(x^2) - h(x^4)$ положительна при любых значениях $a > 1$ и $b > 1$. Знак разности $h(x^2) - h(x^1)$ зависит от конкретных величин a и b . В частности, она положительна для каждой из следующих трех комбинаций значений параметров a и b : $a = 3, b = 2$; $a = 3, b = 3$; $a = 4, b = 2$.

Таким образом, согласно МАИ, все варианты упорядочены по предпочтительности, причем вариант x^2 всегда предпочтительнее варианта x^4 , и существуют условия, при которых вариант x^2 является наилучшим, что не согласуется с интуитивными ожиданиями, представленными выше. Причина этого, как показано в статье [6],

состоит как раз в том, что МАИ присуща «интеллектуальная ошибка», о которой речь шла выше.

Рассмотрим теперь аргументы, приведенные в статье [7] с целью доказательства неправомерности применения дескриптивного подхода к решению нашей задачи.

1. «В процессе решения задачи на основе ТВК авторы прибегают к сравнению варианта x^1 , имеющего векторную оценку (e, g) с гипотетическим, безразличным вариантом x^5 , имеющим векторную оценку (g, e) . И здесь мы отметим следующее обстоятельство: использование гипотетических вариантов — «безопасный» прием с позиций ТВК, не является «безопасным» в рамках дескриптивного подхода МАИ. Иными словами, использование гипотетических вариантов, т. е. дополнительных вариантов при неизменной структуре множества критериев, приводит к изменению порядка ранжированных вариантов, если эта ранжировка выполнялась на основе парных сравнений. Этот факт известен как нарушение принципа инвариантности при использовании дескриптивного подхода в МАИ <...>. Формально в силу этого обстоятельства «дескриптивный подход» некорректно применять для решения рассматриваемой задачи, если сравнивать результаты на его основе с решением на основе ТВК.»

Постараемся дать ответ на эту не вполне ясно сформулированную критику. Во-первых, порядок решения задачи определенным методом (в данном случае МАИ) нелогично ставить в зависимость от того, будет ли сравниваться получаемый при этом результат с результатами, полученными (или которые могут быть получены) другими методами (в данном случае ТВК), или не будет. Во-вторых, введение гипотетического варианта x^5 было сделано в ходе решения задачи при помощи ТВК. А в ходе решения задачи с использованием МАИ никакого дополнительного варианта не вводилось.

2. «...нормативный подход в решении рассматриваемого «контрпримера» необходим в силу постановки задачи, так как оценки по критериям f_1 и f_2 (e — отлично, g — хорошо, m — посредственно) с очевидностью предполагают сравнение рассматриваемых вариантов с некоторым стандартом по этим критериям. Именно для таких постановок и разработан «нормативный» подход в МАИ.»

При нормативном подходе используется понятие идеальной альтернативы, или стандарта, как некоего фиктивного варианта, который имеет самые высокие оценки по всем критериям; относительно него и производится нормировка приоритетов вариантов по критериям. К сожалению, четких, однозначных рекомендаций, когда следует применять дескриптивный, а когда — нормативный подход, в литературе по МАИ нет. По этой причине были проведены исследования по сравнению результатов, получаемых при разных подходах. «В статистических испытаниях с 10 критериями и 3 вариантами оба способа дали одинаковые результаты выбора в 92 % случаев» [2, с. 45]. По этой же причине решение задачи о покупке дома в работе [2, с. 40–45] выполнено параллельно двумя подходами. В обоих случаях получена одна и та же упорядоченность вариантов по предпочтительности: $\langle B, A, C \rangle$, так что наиболее предпочтительным оказался вариант B . Но тут следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Рассмотрим, например, интегральные приоритеты вариантов B и A :



при дескриптивном подходе: $h^d(B) = 0,369$; $h^d(A) = 0,346$;

при нормативном подходе: $h^h(B) = 0,383$; $h^h(A) = 0,315$.

Поскольку МАИ позиционируется как метод измерения предпочтений в шкале отношений, то имеет смысл рассчитать отношения:

$$h^d(B) : h^d(A) = 1,07; \quad h^h(B) : h^h(A) = 1,22.$$

Второе из этих соотношений больше первого на 14 %. А ведь в сложных и ответственных задачах принятия решений интегральные приоритеты используются как количественные оценки для формулировки практических рекомендаций, например, по распределению ресурсов.

По нашему мнению, не очевидно, что для решения нашей задачи нужно сравнивать варианты «с некоторым стандартом». Более того, так поступать, в свете выше изложенного, вовсе не обязательно.

2. ПРИМЕР 2

Пусть в задаче из примера 1 имеется только три варианта x^1, x^2 и x^3 со следующими векторными оценками:

$$f(x^1) = (m, e); \quad f(x^2) = (e, m), \quad f(x^3) = (g, g).$$

Следуя статье [7] в рамках нормативного подхода, обозначим через $i(e), i(g)$ и $i(m)$ «интенсивности» соответствующих шкальных оценок. Используя прежние обозначения для степеней превосходства в предпочтительности и полагая $i(e) = 1$, получаем:

$$i(e) = 1, \quad i(g) = 1/a, \quad i(m) = 1/(ab).$$

Для ненормированных приоритетов вариантов имеем выражения:

$$h^*(x^1) = \frac{1}{2}(1/ab + 1) = (ab + 1)/(2ab);$$

$$h^*(x^2) = \frac{1}{2}(1 + 1/ab) = (ab + 1)/(2ab);$$

$$h^*(x^3) = \frac{1}{2}(1/a + 1/a) = 1/a.$$

Предположим, что имеется информация о том, что рост предпочтений вдоль шкалы критериев замедляется: при переходе от шкальной оценки m к оценке g предпочтения возрастают больше, чем при переходе от оценки g к e . Тогда интуитивно ясно, что наиболее предпочтительным является вариант x^3 (и этот вывод легко получить при помощи ТВК).

Рассмотрим разность

$$h^*(x^2) - h^*(x^3) = (a - 2 + 1/b)/2a.$$

Эта разность при любых значениях параметров a и b из «фундаментальной шкалы» МАИ $\{1, 2, \dots, 9\}$, таких, что $a > 1$ и $b > 1$, положительна, так что вариант x^2 (а также и вариант x^1), согласно нормативному подходу, оказывается предпочтительнее варианта x^3 !

3. ПРИМЕР 3

Рассмотрим следующую двухкритериальную задачу. Областью значений критерия f_1 является отрезок $[0, 2]$, а областью значений критерия f_2 служит отрезок $[0, 3]$. На множестве векторных оценок $y = (y_1, y_2)$ — области

значений Y векторного критерия $f = (f_1, f_2)$ — предпочтения описываются порядковой, или ординальной функцией ценности

$$v(y) = w_1 v_1(y_1) + w_2 v_2(y_2),$$

где $w_1 = w_2 = 1/2$, $v_1(y_1) = y_1$, $v_2(y_2) = -\frac{1}{6}y_2^2 + \frac{7}{6}y_2$.

Имеется три варианта x^1, x^2 и x^3 со следующими векторными оценками:

$$f(x^1) = (2, 1); \quad f(x^2) = (1, 0); \quad f(x^3) = (0, 1).$$

Заметим, что $v_1(0) = v_2(0) = 0$, $v_1(1) = v_2(1) = 1$, $v_1(2) = v_2(3) = 2$, так что

$$v(f(x^1)) = 1,5; \quad v(f(x^2)) = v(f(x^3)) = 0,5.$$

Поэтому упорядоченность вариантов выглядит следующим образом: $\langle x^1, x^2 - x^3 \rangle$, т. е. наиболее предпочтителен вариант x^1 , а варианты x^2 и x^3 одинаковы по предпочтительности.

Решим задачу ранжирования вариантов при помощи МАИ. Пусть $a > 1$ — степень превосходства в предпочтительности по первому критерию шкальной оценки 2 над оценкой 1, и $b > 1$ — степень превосходства в предпочтительности шкальной оценки 1 над оценкой 0; степень превосходства оценки 2 над оценкой 0 равна ab . Пусть c — степень превосходства в предпочтительности по второму критерию шкальной оценки 1 над оценкой 0. Заметим, что поскольку векторные оценки $(1, 0)$ и $(0, 1)$ одинаковы по предпочтительности и $w_1 = w_2$, то $c = b$. Согласованные матрицы парных сравнений вариантов по каждому из критериев представлены табл. 1 и 2.

Для этих матриц получаем следующие векторы приоритетов как их правые собственные нормированные векторы, соответствующие максимальному собственному числу 3:

$$(p_1(x^1), p_1(x^2), p_1(x^3)) = \left(\frac{ab}{ab+b+1}, \frac{b}{ab+b+1}, \frac{1}{ab+b+1} \right);$$

$$(p_2(x^1), p_2(x^2), p_2(x^3)) = \left(\frac{b}{2b+1}, \frac{1}{2b+1}, \frac{b}{2b+1} \right).$$

Согласно нормативному подходу приоритеты вариантов по каждому из критериев следует разделить на наибольший из приоритетов, и полученные величины

Таблица 1

Матрица парных сравнений вариантов по первому критерию

f_1	x^1	x^2	x^3
x^1	1	a	ab
x^2	$1/a$	1	b
x^3	$1/ab$	$1/b$	1

Таблица 2

Матрица парных сравнений вариантов по второму критерию

f_2	x^1	x^2	x^3
x^1	1	b	1
x^2	$1/b$	1	$1/b$
x^3	1	b	1

$p_i^*(x^j)$ использовать при формировании интегральных приоритетов вариантов. В рассматриваемой задаче:

$$p_1^*(x^1) = 1, \quad p_1^*(x^2) = 1/a, \quad p_1^*(x^3) = 1/(ab);$$
$$p_2^*(x^1) = 1, \quad p_2^*(x^2) = 1/b, \quad p_2^*(x^3) = 1.$$

Получаем следующие ненормированные интегральные приоритеты вариантов $h^*(x^j) = \frac{1}{2} p_1^*(x^j) + \frac{1}{2} p_2^*(x^j)$:

$$h^*(x^1) = 1, \quad h^*(x^2) = (a + b)/(2ab), \quad h^*(x^3) = (ab + 1)/(2ab).$$

После их нормировки приходим к конечному результату:

$$h^H(x^1) = 1/s, \quad h^H(x^2) = (a + b)/(2abs),$$
$$h^H(x^3) = (ab + 1)/(2abs),$$

где $s = (4ab + 1)/(2ab)$.

Поскольку

$$h^H(x^3) - h^H(x^2) = \frac{(a-1)(b-1)}{2abs} > 0,$$

то вариант x^3 оказывается более предпочтительным по сравнению с вариантом x^2 !

Легко увидеть, используя формулы для приоритетов на с. 77, что и при дескриптивном подходе один из этих вариантов оказывается предпочтительнее другого!

Отметим, что если, например, областью значений второго критерия будет отрезок $[0, 2]$ и $v_2(y_2) = (y_2 - 1)^3 + 1$, то результаты окажутся такими же.

4. ОБ ОРДИНАЛЬНЫХ И КАРДИНАЛЬНЫХ МЕТОДАХ

В Заключение статьи [7] утверждается: «Добавим, что в свете классических результатов, полученных К. Эрроу, к *ординальным* методам следует относиться достаточно осторожно, а *кардинальные* представления, аналогичные фундаментальной шкале МАИ и относительности измерений, позволяют надеяться на успешное развитие эффективных в *прикладном* плане методов анализа многокритериальных задач с иерархической и сетевой структурой».

Вопрос о возможностях и перспективах применения ординальных и кардинальных методов для моделирования предпочтений представляет большой теоретический и прикладной интерес, но его обсуждение выходит за рамки данной статьи. Поэтому ограничимся только двумя замечаниями.

1. Известная теорема Эрроу о невозможности [9] и дальнейшие аксиоматические исследования (см. обзорную работу [10]) касаются проблемы группового выбора путем голосования и никакого отношения к проблематике, обсуждаемой в работах [6, 7] и данной статье, не имеют.

2. Возможности применения кардинальных методов для описания предпочтений, особенно тех, которые опираются на шкалы отношений, в свете исследований последних лет [11] представляются, по меньшей мере, весьма сомнительными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод анализа иерархий в глазах его многочисленных приверженцев имеет целый ряд достоинств. Однако его пользователям следует иметь в виду, что в основаниях этого по сути эвристического метода имеется ряд пробелов и ошибочных допущений. Одно из них состоит в том, что можно производить нормализацию приоритетов вариантов по каждому из критериев в отдельности вне связи с приоритетами самих критериев. Применение подобных процедур нормализации было названо «интеллектуальной ошибкой». Поэтому рекомендации, получаемые при решении практических многокритериальных задач принятия решений с применением как дескриптивного, так и нормативного подходов МАИ, нельзя считать научно обоснованными.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Saaty T.* Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
2. *Saaty T.J.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: пер. с англ. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — 360 с.
3. *Foundation of measurement / D.H. Krantz, R.D. Luce, P. Suppes, A. Tverski.* — N.-Y.: Academic Press, 1971. — Vol. 1. — 578 p.
4. *Belton V., Stewart T.J.* Multiple criteria decision analysis. An integrated approach. — Boston: Cluwer, 2003. — 374 p.
5. *Edwards W., Barron F.H.* SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement // *Organization Behavior and Human Processes.* — 1994. — Vol. 60. — P. 306–325.
6. *Подиновский В.В., Подиновская О.В.* О некорректности метода анализа иерархий // *Проблемы управления.* — 2011. — № 1. — С. 8–13.
7. *Митухин В.Г.* Об одном контрпримере для метода анализа иерархий // *Проблемы управления.* — 2012. — № 3. — С. 77–79.
8. *Подиновский В.В.* Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / Уч. пособие. — М.: Физматлит, 2007. — 64 с.
9. *Arrow K.J.* Social choice and individual values. — N.-Y.: Wiley, 1951. Second edition: New Haven and London: Yale University Press, 1963. / Русский перевод: Эрроу К. Дж. Коллективный выбор и индивидуальные ценности. — М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2004. — 204 с.
10. *Алескерев Ф.Т.* Локальные модели голосования. Обзор аксиоматических методов // *Автоматика и телемеханика.* — 2000. — № 10. — С. 3–26.
11. *Barzilai J.* Preference function modelling: The mathematical foundations of decision theory // *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis / Ehrgott M., Figueira J.R., Greco S. (Eds.).* — N.-Y.: Springer, 2010. — P. 57–86.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Т. Алескеревым.

Подиновский Владислав Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры, вед. науч. сотрудник международной научно-учебной лаборатории анализа и выбора решений; Национальный исследовательский университет — Высшая школа экономики, г. Москва; ☎ (495) 621-13-42, ✉ podinovski@mail.ru,

Подиновская Ольга Владиславна — вед. специалист, Банк ВТБ-24, г. Москва; ☎ (495) 960-24-24, доб. 51-36, ✉ podinovskaya@mail.ru.

НАУКА УПРАВЛЕНИЯ НА ПУТИ СОЗДАНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ (по материалам IX международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '12)

Рассмотрены некоторые научные аспекты IX международной конференции, которые в основном отражают формирующуюся в настоящее время тенденцию превращения научного знания об идентификации объектов управления в общую теорию идентификации. Приведен краткий обзор тематики конференции и содержания некоторых докладов.

Ключевые слова: идентификация систем, общая теория идентификации, инженерная практика, конференция, обзор.

ВВЕДЕНИЕ

В Москве, в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН с 30 января по 2 февраля 2012 г. состоялась IX международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'12. В ее организации участвовали Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Российский национальный комитет по автоматическому управлению, Российский фонд фундаментальных исследований (проект РФФИ 12-01-06004), Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН.

Цели конференции: подвести итоги достигнутый в области разработки математических и методологических основ структурной, параметрической и непараметрической идентификаций; обсудить результаты и проблемы применения методологии и математических средств идентификации в процессе решения инженерных задач; выделить наиболее перспективные направления и наметить пути их дальнейшего развития; объединить усилия специалистов, заинтересованных в обсуждении и исследовании проблем идентификации, и способствовать установлению личных контактов между ними.

Ее основные темы: теория и методология моделирования, идентификации и управления; структурная, параметрическая и непараметрическая идентификации; интеллектуальные методы моде-

лирования, идентификации и управления; теория систем управления с идентификатором; методологическое, математическое и программное обеспечение прикладных задач идентификации систем; имитационное моделирование; инженерное моделирование слабо изученных объектов управления; методы верификации и оценки качества программного обеспечения сложных систем.

В программу конференции были включены 3 пленарных и 77 секционных докладов. Полные тексты 80 докладов (14 из них представлены исследователями, работающими в 11-ти зарубежных странах) опубликованы на компакт-диске, который официально зарегистрирован (ISBN 978-5-91450-098-3) как сборник Трудов конференции объемом 1168 стр. и тиражом 500 экз. [1].

На конференции работали шесть секций: структурная и параметрическая идентификации; стохастические системы и непараметрическая идентификация; интеллектуальные методы моделирования, идентификации и управления; приложения методов идентификации; сложные системы; адаптивные и робастные системы.

Содержание нынешней конференции отличалось от предыдущих особым акцентом на развитие математических основ структурной и непараметрической идентификаций; интеллектуальных методов идентификации; теории и методологии идентификации на предпроектных и проектных стадиях создания систем автоматического управ-

ления; предсказательного моделирования в информационно-управляющих системах.

В настоящем сообщении рассмотрены только некоторые научные аспекты конференции, которые в основном отражают формирующуюся в настоящее время тенденцию превращения научного знания об идентификации объектов управления в общую теорию идентификации. Термин «общая теория идентификации объектов управления» понимается в широком смысле, т. е. данная теория, как минимум, должна содержать методы и средства, которые необходимы для экспериментального построения математической модели объекта управления любой природы и любого начального уровня изученности в целях проектирования системы автоматического управления (САУ) или в целях управления этой системой.

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ИНЖЕНЕРНАЯ ПРАКТИКА

На предпроектных стадиях создания САУ объекты управления можно классифицировать на адекватно, хорошо и слабо изученные объекты, а также объекты другой степени изученности.

Адекватно изученным объектом управления назовем реальный объект, детально изученный в естествознании, где для него сконструирована адекватная математическая модель. Математические основы теории автоматического управления, созданные в 1960-х гг., как раз и предназначались для решения задач проектирования САУ, состоящей из адекватно изученного объекта управления и автоматического управляющего устройства. Данный этап развития теории точно характеризуют следующие высказывания Р. Калмана [2, с. 64]: «О теории адаптивного управления много и долго говорят, но в ней очень мало сделано»; «В задаче неадаптивного управления (когда информация о структуре объекта имеется) предполагается, что динамические свойства объекта известны в точности, и остается «только» определить текущее состояние в каждый момент времени»; «Мы считаем задачу адаптивного управления задачей будущего и не станем останавливаться на ней здесь».

Хорошо изученным объектом управления назовем реальный объект, любое достоверное математическое описание которого не содержит структурных параметров, но включает в себя конечное число постоянных и переменных неструктурных параметров, причем только приемлемые значения постоянных неструктурных параметров коллектив разработчиков намерен определить на предпроектных стадиях на основе экспериментальных данных. Структурным параметром считается буквенная константа математического описания объекта управления, которая интерпретируется как поря-

док уравнения или размерность вектора, или как множество допустимых значений переменной, параметра, вектора переменных или параметров. Неструктурным параметром называется любой параметр математического описания объекта управления, который не является структурным параметром.

Научное исследование проблем адаптивного управления хорошо изученным объектом началось в первой половине 1950-х гг. В 1958 г. Р. Калман и А.А. Красовский предложили первые два алгоритма адаптивного управления. Однако существенные результаты в данном направлении были получены только в 1970-х гг. [3–6]. В настоящее время теория адаптивного управления представляет собой хорошо развитую математическую дисциплину, к которой имеется большое число собственных методов синтеза алгоритмов адаптивного управления. Однако ошибочно полагать, что развитие математического аппарата теории близко к окончательному завершению и необходимо основные научные исследования нацелить на разработку эффективных методов практического применения аппарата теории в различных инженерных приложениях. Трудные и нерешенные математические проблемы есть даже в линейной теории управления [7].

В рамках теории адаптивного управления в основном решены ключевые математические проблемы, возникающие в процессе анализа и проектирования адаптивных систем управления для базисных инженерных приложений теории. Однако из-за больших математических трудностей многие актуальные проблемы еще не решены окончательно. Поэтому имеют место и критические высказывания: «Таким образом, часто в ущерб реальности, но в угоду теории, сформировался банк упрощенных моделей, с которыми и по сей день, в основном, имеют дело в управлении, и что по сути дела является одним из препятствий, о котором «спотыкается» теория управления на практике» [8, с. 13]. Известны также и другие критические мнения [9, 10].

Тем не менее, представляется несомненным, что математический аппарат теории адаптивного управления в основном ориентирован на практическое применение в инженерных приложениях и служит важным элементом математического обеспечения современных САПР систем автоматического управления. Исследования в области идентификации систем оказали существенное влияние на развитие и современное состояние теории адаптивного управления. Один из основных ее разделов — теория адаптивных систем управления с идентификатором, в построении которой ключевую роль сыграли исследования в области идентификации систем. Обзор основных направлений этой теории приведен в докладе А.Л. Бунича «Идентификационный подход к построению систем уп-



правления дискретными объектами с ограниченной неопределенностью», представленный на секции «Структурная и параметрическая идентификации».

Слабо изученным объектом управления назовем реальный объект, любое достоверное математическое описание которого содержит хотя бы один структурный параметр, приемлемое значение которого коллектив разработчиков намерен определить на предпроектных стадиях на основе экспериментальных данных. Особенность слабо изученного объекта управления состоит в том, что для него на предпроектных стадиях создания САУ необходим существенный и качественный рост модельного знания. Иными словами, на предпроектных стадиях необходимо перейти с уровня знания слабо изученного объекта на уровень знания коллективом разработчиков приемлемого, с его точки зрения, приближения к инженерной модели объекта управления. Данный переход можно совершить с помощью инженерного моделирования объекта управления, инженерного конструирования и инженерной верификации математической схемы САУ, которые должны быть организованы как итерационные процессы, субъектом которых является коллектив разработчиков САУ.

В настоящей работе выражение «инженерное моделирование объекта управления» понимается в узком, сугубо практическом и управленческом смысле. Инженерным моделированием объекта управления (кратко, инженерным моделированием) называется реальный процесс обработки данных и знаний об объекте управления, который:

— организует и реализует коллектив разработчиков САУ, состоящий в основном из специалистов инженерных профессий;

— реализуется на предпроектных и проектных стадиях создания САУ, удовлетворяющей в условиях опытной эксплуатации требованиям технического задания на ее создание;

— организуется коллективом разработчиков САУ как средство поиска адекватной модели объекта управления, т. е. математической модели, на основе которой данный коллектив разработчиков может сконструировать САУ, удовлетворяющую в условиях нормальной эксплуатации требованиям технического задания на ее создание;

— заканчивается построением инженерной модели объекта управления, т. е. математической модели, которую коллектив разработчиков САУ включает в состав исходных данных, необходимых для построения математической схемы проектируемой САУ, вводимой в промышленную эксплуатацию.

Проблемам инженерного моделирования слабо изученного объекта управления посвящен доклад *К.С. Гинсберга* «Концепция научного проектирования инженерного моделирования для слабо изученных объектов управления: новый подход к пробле-

мам структурной идентификации», представленный на секции «Структурная и параметрическая идентификации». Инженерное моделирование слабо изученного объекта управления можно реализовать с помощью четырех процессов: планирования и сбора данных и знаний; структурной идентификации; параметрической (или непараметрической) идентификации; верификации. Наличие в составе моделирования структурной, параметрической (или непараметрической) идентификации означает, что классические направления идентификации систем будут играть ключевую роль в научных исследованиях проблем инженерного моделирования слабо изученного объекта управления.

Представляется также, что в будущем научный предмет идентификации систем может значительно выйти за границы традиционных целей, проблем и задач. Данная гипотеза основана на возможности интерпретации инженерного моделирования как системной идентификации объекта управления для целей проектирования. Наличие данной возможности непосредственно следует из общих определений идентификации объекта управления Л. Льюнга, Н.С. Райбмана, Дж. Саридиса, Я.З. Цыпкина и П. Эйкхоффа [11, с. 142–143]. Поэтому, возможно, историческая миссия идентификации систем состоит не только в том, чтобы научно исследовать традиционные проблемы идентификации и проектировать опытные образцы адаптивных систем управления с идентификатором. В частности, возможно, что ее назначение состоит также в системном исследовании проблем экспериментального построения математической модели объекта управления в целях проектирования новых САУ.

2. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

В докладе *Н.Н. Бахтадзе* и *В.А. Лотоцкого* «Метод идентификации с обучением, основанном на ассоциативном поиске» изложен подход, основанный на имитации ассоциативного мышления оператора, и представлены алгоритмы идентификации, использующие ассоциативный поиск для порождения знаний об объекте управления. Предложены алгоритмы ассоциативного поиска, позволяющие с высокой точностью моделировать динамические нестационарные объекты. Показано, что процедуры ассоциативного поиска, основанные на использовании вейвлет-анализа, открывают новые эффективные подходы к идентификации нестационарных систем.

Один из основных методов синтеза нелинейных систем управления заключается в преобразовании исходного нелинейного дифференциального уравнения, моделирующего динамику объекта, в уравнение линейной структуры, но с параметрами,

зависящими от состояния. Использование квадратичного функционала качества управления с матрицами штрафа, которые также зависят от состояния объекта, позволяет при синтезе управления перейти от уравнения Гамильтона — Якоби — Белмана к уравнению типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния. Это и составляет основу SDRE-метода синтеза оптимальных нелинейных систем управления. Основная проблема реализации SDRE-метода заключается в необходимости отыскания решения матричных нелинейных уравнений типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния, в темпе функционирования управляемого динамического объекта.

В докладе *В.Н. Афанасьева* «Оптимальное управление нелинейным объектом с параметрами, зависящими от состояния» это решение находится в символьном виде алгебраическим методом, что позволяет обобщить ряд ранее опубликованных теоретических результатов и получить конструктивные решения некоторых постановок задач управления. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы для адекватно изученных объектов управления или служить фундаментальным математическим обеспечением процесса проектирования адаптивных систем управления с идентификатором.

В докладе *P. Rozewski, O. Zaikin, E. Kuszina* (Poland) «Model of the learning — teaching process in OSDL» («Модель обучения — преподавания в Открытой Системе Дистанционного Обучения») утверждается, что анализ научной литературы, проектов и имеющихся на рынке продуктов показывает, что дистанционное обучение является новым направлением в развитии информационных систем. В этой литературе, однако, отсутствует системное понимание дистанционного обучения как комплексной информационной системы. Доклад, по сути, представляет собой первую попытку такого системного понимания.

Авторы доклада проводят достаточно полный анализ информационных систем и методов дистанционного образования на основе теории иерархических многоуровневых систем, который позволяет разработать модель OSDL. Как результат такого системного анализа предложена схема управления для OSDL.

3. СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ

3.1. Основные темы научных исследований

По ключевым признакам — решаемой задаче, применяемым средствам и основному научному результату — доклады секции «Структурная и параметрическая идентификации» можно отнести к трем темам: общие математические основы иден-

тификации; математические основы параметрической идентификации; методологические и математические основы структурной идентификации.

3.2. Общие математические основы идентификации

В докладе *В.А. Русанова, Л.В. Антонова и А.В. Данеева* «К формально разрешимым реализациям нелинейных дифференциальных систем в банаховом пространстве» на языке сигнальных функций и оператора Релея — Ритца обсуждаются необходимые и достаточные условия разрешимости задачи дифференциальной реализации динамической системы (D -системы). Развита теоретико-системный подход, позволяющий увидеть задачи дифференциальной реализации D -систем в новом теоретико-модельном аспекте и отделить вопросы существования реализации от чисто вычислительных процедур. За пределами доклада остался прикладной аспект проблемы реализации бесконечномерных систем. Авторы рассматривают свой доклад как первый этап в изучении нелинейной дифференциальной реализации сложных динамических процессов.

В теории управления под инвариантностью понимается независимость какой-либо системы автоматического регулирования от приложенных к ней внешних возмущений. Первым, кто обратил внимание на это свойство, был, по-видимому, Г.В. Щипанов. Его идеи развиты Б.Н. Петровым, который сформулировал принцип инвариантности систем автоматического регулирования. В докладе *А.Г. Кушнера и В.В. Лычагина* «Инвариантность Петрова и идентификация гамильтоновых систем с управляющим параметром» возмущения системы интерпретируются как преобразования, изменяющие систему. Если такие преобразования образуют псевдогруппу Ли, то, как считают авторы, теорией преобразований Софуса Ли можно воспользоваться для изучения инвариантности в смысле Петрова, и изложенные в докладе результаты составляют первый этап реализации этой идеи. В докладе рассмотрена проблема классификации гамильтоновых систем с управляющим параметром относительно преобразований обратной связи. Слово «идентификация» в названии доклада употребляется для обозначения процесса классификации гамильтоновых систем с управляющим параметром, что не соответствует его традиционному смыслу в идентификации систем, где идентификацией называется построение математической модели реальной системы, основанное на обработке ее наблюдаемых входных и выходных сигналов. Тем не менее, несомненно, что данная работа относится к общим математическим основам идентификации, так как наличие детальной классификации математических моделей объектов управления является необходимым условием реализации любой идентификации.



В докладе *А.Н. Агаджанова* «Идентификация фрактальных управлений Бутковского — Бэра в задачах управления колебательными распределенными системами» приведен обзор, посвященный фрактальным функциям, т. е. непрерывным функциям, не обладающим классической производной ни в одной точке из области определения. Доклад содержит шесть теорем об общих свойствах фрактальных функций, доказательства которых не приводятся; одна из них доказана автором. Представлены также результаты автора, связанные с аппроксимативной дифференцируемостью функций, в частности, теорема, которая впервые в научной литературе фиксирует факт существования финитных аппроксимативно сингулярных функций. Автор выделяет во множестве фрактальных функций класс функций, который он назвал фрактальным классом Бутковского — Бэра. Это название предложено автором в знак уважения к научным достижениям А.Г. Бутковского и Р. Бэра. Строгое определение указанного класса задано определением: «Будем говорить, что функция f принадлежит фрактальному классу Бутковского — Бэра на отрезке $[-a, a]$, если она непрерывна, ни в одной точке данного отрезка не дифференцируема, финитна и аппроксимативно сингулярна на $[-a, a]$ ». Автор не только доказывает теорему о существовании функций в классе Бутковского — Бэра, но и приводит пример формульно заданной функции, которая принадлежит этому классу, а также указывает некоторые общие свойства функций из данного класса: «они не имеют ни одного интервала монотонности (поскольку не имеют ни в одной точке классической производной), но их аппроксимативная производная почти всюду равна 0».

В смысле указанных результатов, доклад относится к очень редкому в области идентификации систем типу исследований, в которых развивается аппарат математики. Слово «идентификация» в названии доклада употребляется для обозначения процесса построения последовательности управляющих функций, дающих в поточечном пределе искомую управляющую функцию из класса Бутковского — Бэра, что не соответствует традиционному смыслу этого слова в идентификации систем. Тем не менее, несомненно, что данная работа относится к общим математическим основам идентификации, так как в докладе, по сути дела, предлагается новый класс общих математических моделей объектов управления, что, несомненно, расширит моделирующие возможности идентификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие методологии и математических средств идентификации в условиях интенсивного роста и совершенствования информационных тех-

нологий переживает новый подъем и возрождение. В настоящее время это развитие представляется еще более актуальным и практически значимым, чем 1950-е гг., когда основными мотивами создания методов и средств идентификации были настоящие проблемы инженерной практики. Идентификация систем как научная дисциплина, в рамках которой порождается и концентрируется рациональное знание о механизмах идентификации, может, в силу своей уникальной проблематики, рассматриваться в качестве одного из базисных направлений современной науки управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды IX международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'12. — М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. — 1168 с.
2. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. — М.: Мир, 1971. — 400 с.
3. Aseiline J.A., Mancini A.R., Sartune C.W. A survey of adaptive control systems // IRE Trans. on Automatic Control. — 1958. — Vol. AC-6, N 12. — P. 102—108.
4. Эшер Р.Б., Андрисани Д., Дорато П.П. Литература по теории адаптивных систем // Тр. Ин-та инженеров по электронике и радиотехнике. — 1976. — Т. 64, № 8. — С. 126—142.
5. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.Н. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. — М.: Наука, 1977. — 272 с.
6. Дерезицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. — М.: Наука, 1981. — 216 с.
7. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Возможные подходы к решению трудных задач линейной теории управления // Тр. III международной конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'04 / ИПУ РАН. — М., 2004. — С. 23—63.
8. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. — М.: Физматлит, 1997. — 352 с.
9. Красовский А.А. Исторический очерк развития и состояния теории управления // А.А. Красовский Избранные труды: Самые ранние — самые новые. — М.: Наука, 2003. — С. 474—507.
10. Перельман И.И. Анализ современных методов адаптивного управления с позиций приложения к автоматизации технологических процессов // Автоматика и телемеханика. — 1991. — № 7. — С. 3—32.
11. Гинсберг К.С. Истоки и перспективы исследований по структурной идентификации производственных процессов // Матер. конф. «Управление в технических системах» (УТС—2010). — СПб.: «ОАО «Концерн «Электроприбор». — 2010. — С. 142—145.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.П. Боровских.

Гинсберг Константин Симонович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-87-59, ✉ ginsberg@mail.ru.

CONTENTS & ABSTRACTS

THEORY OF CONTROL IN ORGANIZATIONS AND OTHER ORGANIZATIONAL 2

Burkov V.N., Goubko M.V., Korgin N.A., Novikov D.A.

The paper analyzes the place of theory of control in organizations (historically originating from the theory of active systems and being an extension of the latter) within a system of contemporary management and organizational studies. A unified system of classifications is defined to compare different fields of organization studies, briefly list and classify modern schools and theories that investigate various problems of management and organizational control, compare the theory of control in organizations with other theories in terms of the chosen system of classifications.

Keywords: control science, organizational system, management, systems analysis, classification of sciences.

CONSTRUCTIVE METHOD OF INVESTIGATION OF LINEAR COMPOUND SYSTEMS CONTROL 11

Barseghyan V.R.

The paper considers mathematical model of linear compound systems control, described by different differential equations on different time intervals and by some finite conditions for continuation of compound systems motion. Analytical form of compound systems motion is constructed; the properties of motion and geometrical structure of attainability domain are investigated. Necessary and sufficient conditions for complete controllability are formulated. The method of solution of compound systems control problem and the way of solution of optimal control problems are suggested. Existence conditions for program control and motion are formulated.

Keywords: compound systems, control, complete controllability, optimal control, attainability domain, continuity of movement condition.

MECHANISMS FOR ECONOMIC DECISIONS FOR UTILIZATION OF OIL ASSOCIATED GAS 18

Vassilyev S.N., Aleskerov F.T., Ivanov A.A., Yakuba V.I.

Analysis of problems of utilization of oil associated gas is given. Method for optimal distribution of expenses to laying of gas pipeline, taking into account a financing from oil companies and possible participation of government, is proposed. A multi-criteria model for selection of optimal alternative of utilization of oil associated gas is given. Software is made implementing the developed algorithms.

Keywords: associated petroleum gas recovery, gas pipeline, multi-criteria choice, mechanism design, scenario analysis.

OPTIMAL PORTFOLIO OF INTERDEPENDENT PROJECTS CONSTRUCTION AND TIME OPTIMIZATION 26

Nedovesov M.V., Rudenko Z.G.

The paper considers one approach to solving the optimal portfolio of interdependent projects construction problem. Algorithms for optimal portfolio of effect-interdependent projects construction and time-optimization based on network programming methods are proposed.

Keywords: discrete optimization, mathematical programming, project management, portfolio project management.

EXPRESS-MODEL OF BUSINESS EVALUATION 32

Dranko O.I.

The model of express calculation of business value due to forecasting of cash flow is discussed. The cash flow is built by model of financial forecasting. The main model parameters are taken from available financial reports. The example of business valuation of one largest Russian corporation is given. The comparison with market observation is performed. The conclusion of appropriate accuracy is made.

Keywords: business value, financial forecasting, cash flow.

THE STATIC CORRUPTION MODELS IN THE WATER RESOURCES QUALITY CONTROL SYSTEMS 38

Ougolnitsky G.A., Usov A.B.

The static models of corruption in three-level water resources quality control systems are considered. Different types of corruption (extortion, capture) using different methods of hierarchical management (compulsion, impulsion) are investigated. The possibility of punishment (fine) for bribes for both participants of the corruption relations is provided. The methods of anti-corruption drive are illustrated by typical examples.

Keywords: corruption, extortion, capture, compulsion, impulsion, hierarchical system.

EXPANDED BLOCK-DIAGRAMS FOR «IDEAL» SYSTEM AREA NETWORKS 45

Karavay M.F., Podlazov V.S.

The paper considers the technique of design of 1-expanded block-diagrams which are the extension of symmetric block-diagrams studied in combinatorics. The definition of 1-expanded block-diagram is given, the algorithm of their design and application for construction of distributed full switches as «ideal» system area networks of parallel multiprocessor computer are considered.

Keywords: massive parallel multiprocessor computer, ideal system area network, distributed full switch, nonblocking networks, self-routing networks, arbitrary permutation of data packages, symmetric block design.

COMPUTER SUPPORT OF FORMATION OF PURPOSES AT DESIGNING THE PROTECTION OF INFORMATION SYSTEM 52

Lukinova O.V.

Computer methods of formation of list of purposes of safety of projected system of information protection of the company's automated business processes are considered. The technological environment of business processes is represented by OSE/RM (Open System Environment/Reference Model) model.

Keywords: complex security system, object of protection, Open System Environment/Reference Model, business process, estimated criteria of security.

MULTICRITERIAL CHOICE OF EFFICIENT INFORMATION SYSTEM WITH SERVICE-ORIENTED ARCHITECTURE . . 59

Pyrlina I.V.

The paper presents the results of the study conducted to identify criteria of efficient information system (IS) with service-oriented architecture (SOA) realization and proposes a ranking method to evaluate SOA information systems using a set of architecture quality criteria. The method is used to compare seven SOA projects and ranking result for SOA efficiency of the projects is provided. The choice of SOA realization project depends on the following criteria groups: IS organization, SOA guidelines and change management, processes and business services readiness, risk management and mitigation. The last criteria group was analyzed on the basis of projects statistics.

Keywords: multicriterial ranking method, service-oriented architecture, SOA operational risks, efficiency criteria for IS architecture, projects ranking.

IMPROVEMENT OF QUALITY OF THE DYNAMIC OBJECT DIRECTOR CONTROL 69

Eliseev V.D., Kljuev E.D., Petrin K.V., Teryaev E.D.

The paper proposes the variant of improvement of quality of dynamic object director control owing to use of additional information on a steering wheel deviation.

Keywords: director control, steering wheel, human-operator, plane.

ANOTHER NOTE ON THE INCORRECTNESS OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS 75

Podinovski V.V., Podinovskaya O.V.

In authors' previous paper published in 2011 in «Control Sciences» journal one example of a bi-criterion decision analysis problem demonstrating that the use of Analytic Hierarchy Process (AHP) may lead to a clearly erroneous result is given. However, the author of another paper published in 2012 in the same journal suggested that he found an error in our use of AHP and, consequently, our criticism of AHP is unsubstantiated. In this new paper the authors show that there was no mistake in the use of AHP in their original counter-example, and provide two further counter-examples that support their original conclusion.

Keywords: multiple criteria decision making, analytic hierarchy process, descriptive and normative approaches, ratio scale, priorities of variants, measurement theory.

CONTROL SCIENCE ON THE WAY OF CREATING THE GENERAL THEORY OF CONTROL OBJECTS IDENTIFICATION (On the basis of IX International conference SICPRO'12 materials) 79

Some scientific aspects of IX international conference «System Identification and Control Problems» are considered. These aspects basically reflect the current tendency of transformation of scientific knowledge on control objects identification in the general theory of identification. The brief review of themes of the conference and the contents of some reports is presented.

Keywords: system identification, general theory of identification, engineering practice, conference, review.

К статье В.Н. Буркова, М.В. Губко, Н.А. Коргина, Д.А. Новикова
 «ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ
 И ДРУГИЕ НАУКИ ОБ УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ»
 (см. с. 2–10)

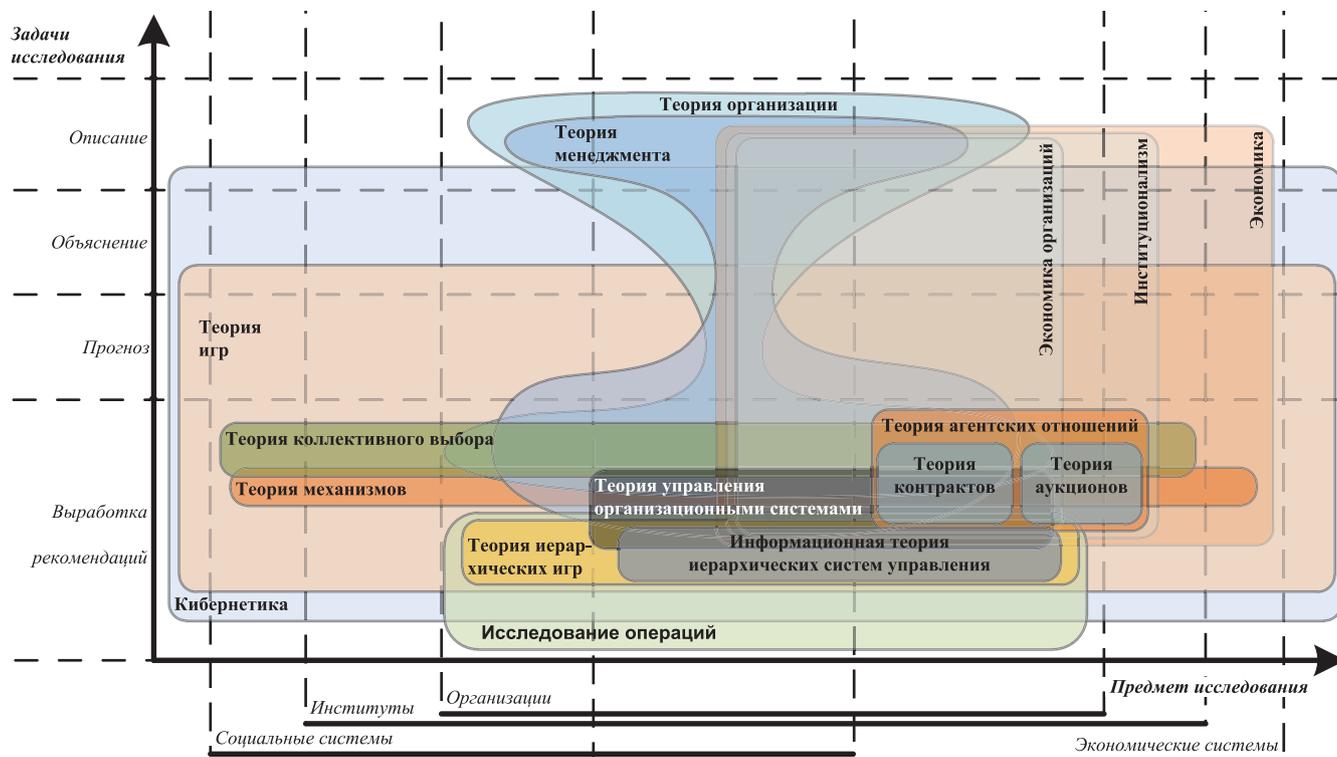


Рис. 1. Научные направления, исследующие управление организациями

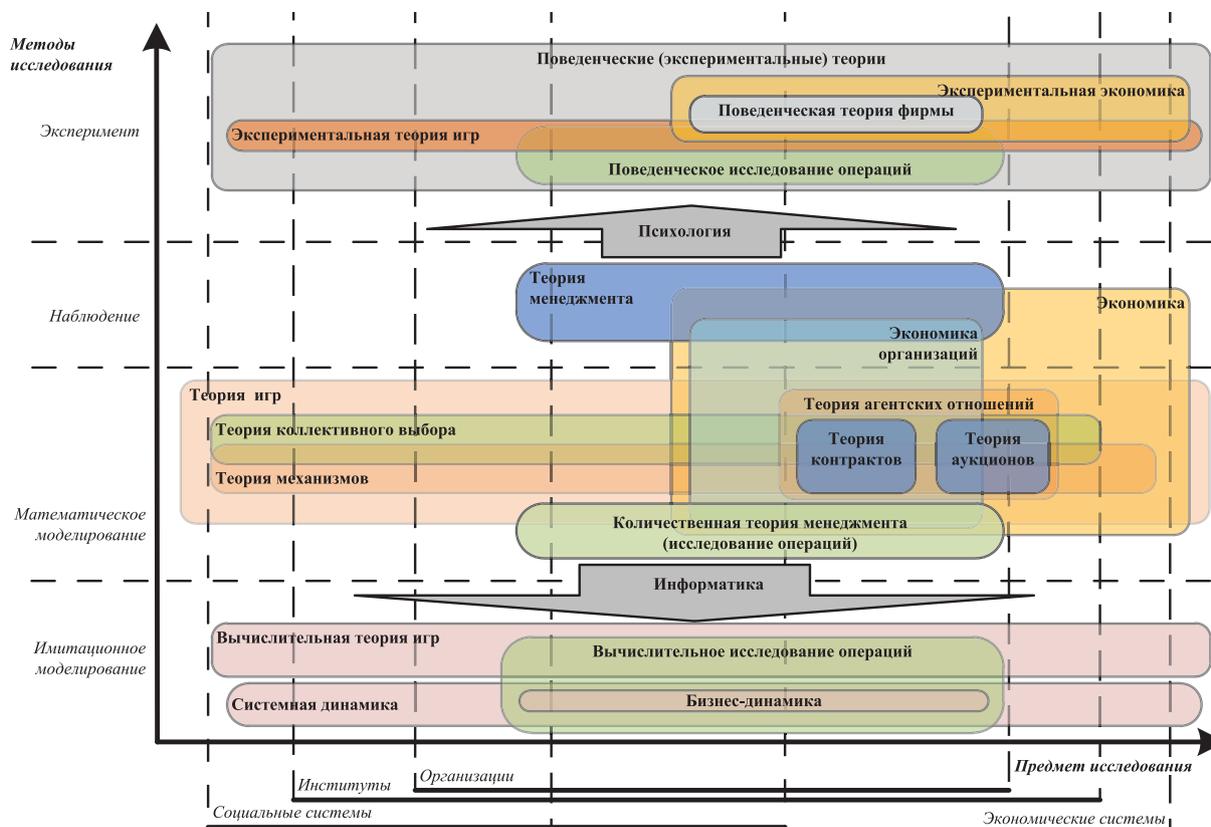


Рис. 2. Экспериментальные и алгоритмические теории

