ISSN 1819-3161

# ПРОБЛЕМЬ! УПРАВЛЕНИЯ

1/2016



#### Редакционный совет

Акад. РАН С.Н. Васильев, акад. РАН С.В. Емельянов, чл.-корр. РАН И.А. Каляев, акад. РАН В.А. Левин, чл.-корр. РАН Н.А. Махутов, акад. РАН Е.А. Микрин, чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко, чл.-корр. РАН А.Ф. Резчиков, акад. РАН Е.А. Федосов

#### Редколлегия

Д-ра техн. наук Ф.Т. Алескеров, В.Н. Афанасьев, Н.Н. Бахтадзе, канд. техн. наук Л.П. Боровских (зам. гл. редактора), д-ра техн. наук В.Н. Бурков, В.А. Виттих, В.М. Вишневский, А.А. Дорофеюк, д-р экон. наук В.В. Клочков, д-ра техн. наук С.А. Краснова, О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, А.П. Курдюков, д-ра физ.-мат. наук А.Г. Кушнер, А.А. Лазарев, д-р техн. наук В.Г. Лебедев, д-р психол. наук В.Е. Лепский, д-р техн. наук А.С. Мандель, д-р биол. наук А.И. Михальский, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков (гл. редактор), д-ра техн. наук Б.В. Павлов, Ф.Ф. Пащенко (зам. гл. редактора), д-р физ.-мат. наук Л.Б. Рапопорт, д-ра техн. наук Е.Я. Рубинович, В.Ю. Рутковский, д-р физ.-мат. наук М.В. Хлебников, д-р техн. наук А.Д. Цвиркун, д-р физ.-мат. наук П.Ю. Чеботарёв, д-р техн. наук И.Б. Ядыкин

#### Руководители региональных редакционных советов

Владивосток – д-р техн. наук О.В. Абрамов (ИАПУ ДВО РАН) Волгоград – д-р физ.-мат. наук А.А. Воронин (ВГУ) Воронеж – д-р техн. наук С.А. Баркалов (ВГАСУ) Курск – д-р техн. наук С.Г. Емельянов (ЮЗГУ) Липецк – д-р техн. наук А.К. Погодаев (ЛГТУ) Пермь – д-р техн. наук В.Ю. Столбов (ПНИПУ) Ростов-на-Дону – д-р техн. наук Г.А. Угольницкий (ЮФУ) Самара – д-р техн. наук В.Г. Засканов (СГАУ) Саратов – д-р техн. наук В.А. Твердохлебов (ИПТМУ РАН) Уфа – д-р техн. наук Б.Г. Ильясов (УГАТУ)



#### **CONTROL SCIENCES**

## Научно-технический журнал

6 номеров в год ISSN 1819-3161

Издается с 2003 года

#### **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. Пащенко

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 ИП Прохоров О. В.

Фото на четвертой странице обложки В.М. Бабикова

Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз» Заказ № РВ116

Подписано в печать 19.01.2016 г.

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в RSCI и Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора 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 1.2016

### СОДЕРЖАНИЕ

Системный анализ	
<b>Кулинич А.А.</b> Семиотические когнитивные карты. Ч. 1. Когнитивни и семиотический подходы в информатике и управлении	
Управление в социально-экономических системах	
<b>Бреер В.В.</b> Модели толерантного порогового поведения (от Т. Шеллинга — к М. Грановеттеру)	11
<b>Буре В.М., Парилина Е.М., Седаков А.А.</b> Консенсус в социальной с двумя центрами влияния	
<b>Пляскина Н.И., Харитонова В.Н.</b> Стратегическое управление и согласование интересов институциональных участников мегапроектов	29
<b>Клочков В.В., Чернер Н.В.</b> Повышение эффективности управления производственным потенциалом предприятий в составе интегрированных структур	
Информационные технологии в управлении	
<b>Байбулатов А.А.</b> Метод расчета гарантированного времени модифи программного обеспечения	
<b>Ведешенков В.А.</b> Организация диагностирования одиночных неиспримилентов цифровых систем со структурой минимального квазил графа размера $7 \times 7$ с двумя путями между двумя абонентами	олного
Философские вопросы управления	
Новиков Д.А. Кибернетика 2.0	73
Управление подвижными объектами и навигация	
Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М. Особенности гиросилов стабилизации собираемой на орбите большой космической конструкции	
* * *	
Contents and abstracts	92



УДК 004.822 (824, 827)

## СЕМИОТИЧЕСКИЕ КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ. Ч. 1. Когнитивный и семиотический подходы в информатике и управлении

А.А. Кулинич

Предложена семиотическая модель когнитивных карт, основанная на принципах прикладной семиотики и представляющая собой симбиоз классических когнитивных карт в виде причинно-следственной сети (орграфа) и понятийной надстройки в виде качественного концептуального каркаса — понятийной системы — множества понятий предметной области, связанных отношением «род — вид». Показано, что предложенная модель позволяет представить множество семиотических когнитивных карт предметной области как частично упорядоченное множество знаков: имени, содержания и объема, определяющих эти когнитивные карты. Предложен алгоритм построения интерпретирующего концептуального каркаса предметной области, направленный на поддержку процессов верификации и интерпретации причинно-следственных отношений в предметной области, заданных когнитивной картой.

**Ключевые слова:** когнитивная карта, когнитивное моделирование, знак, знаковая система, семиотика, прикладная семиотика, концептуальный каркас, понятийная система.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Исследования когнитивных карт и методов их анализа заложили теоретический фундамент для создания систем поддержки принятия решений в плохо определенных динамических ситуациях. Качество систем поддержки принятия решений, основанных на моделировании ситуаций на основе когнитивных карт, в значительной степени определяется не только удобством и развитостью интерфейсов программных систем, реализующих этот подход в управлении, но и качеством самой когнитивной карты — субъективной модели процессов реальности. Под качеством таких систем поддержки принятия решений подразумевается их полезность при принятии решений в слабоструктурированных ситуациях, которая выражается в повышении обоснованности принимаемых решений.

Однако этот критерий — полезность метода для принятия решений и обоснованность решений — трудноизмерим. Косвенно судить о полезности систем поддержки принятия решений на основе когнитивных карт можно по публикациям о применении этого подхода и популярности статей его исследователей. Например, статьи авторов из ИПУ РАН, посвященных этому подходу, входят

в топ самых популярных и цитируемых публикаций журнала «Проблемы управления» [1].

Интерес к методологии когнитивного моделирования подтверждается и многими другими работами. Так, в обзорных работах [2—4] предложена классификация существующих когнитивных карт, приведены методы их анализа, а также описаны компьютерные системы поддержки принятия решений, основанные на моделировании ситуаций с помощью когнитивных карт. В работах [5, 6] рассмотрены вопросы применения методологии когнитивного моделирования в процессах управления. В работах [7—9] рассмотрены вопросы применения когнитивных карт при моделировании игровых постановок в управлении и мультиагентных системах.

Подтверждением применения методологии когнитивного моделирования служат работы в областях социальной психологии [10], образования [11], ракетостроения [12], энергетики [13], нефтедобычи [14], экономики и финансов [15] и др.

Интерес к моделированию с помощью когнитивных карт сложных экономических и социальных ситуаций существует не только в России, но и у иностранных исследователей. Так, в обзорной статье [16] приведены многочисленные примеры исследований и применения методологии когни-



тивного моделирования за последнее десятилетие нашими зарубежными коллегами в области социально-политических наук, в сфере образования, информационных технологий, медицине, бизнесе и др.

Несмотря на безусловную полезность когнитивных моделей, существуют и проблемы, возникающие при моделировании ситуаций на основе грубых (концептуальных) субъективных моделей. В работах [3, 4] обозначены некоторые проблемы когнитивного подхода, возникающие на этапах создания когнитивной карты, ее параметризации, выбора модели динамики, верификации. Проблемы возникают и на этапе анализа результатов моделирования и принятия решений.

Все эти проблемы связаны с высоким уровнем субъективности когнитивной карты и процессов принятия решений с ее помощью. Обычно субъективность ассоциируют с чем-то неточным (неточные (качественные) измерения, гипотеза о структуре когнитивной карты и др.), определяемым личным опытом субъекта. Субъективность противопоставляется объективности (независимости от субъекта): измерение с помощью точных приборов, выявление закономерностей, точные верифицируемые модели и подходы для анализа и моделирования ситуаций. Но в когнитивном моделировании применяются экспертные оценки, качественные измерения, гипотетические структуры, и поэтому субъективность является неотъемлемым свойством методологии когнитивного моделирования.

В условиях неопределенности и дефицита информации субъективность лица, принимающего решение, позволяют качественно решать достаточно сложные проблемы, привлекая для этого собственные интеллектуальные способности.

Когнитивная карта — это модель знаний эксперта о процессах в динамической ситуации, которая формально представляется в виде ориентированного знакового графа (иначе однородной семантической сети) с причинно-следственными отношениями (W, F), где  $W = |w_{ii}|$  — матрица смежности орграфа,  $w_{ii} \in [-1, 1], F$  — множество факторов (параметров) динамической ситуации,  $F = \{f_i\}, i = 1, ..., n.$  Для каждого фактора определено множество значений  $X_i = \{x_{ia}\}, x_{ia} \in [-1, 1] \ \forall q.$ Задана система конечно-разностных уравнений вида:  $X(t+1) = W \cdot X(0)$ , где X(0) — вектор начального приращения значений факторов, t = 0; X(t + 1) вектор изменений значений факторов в моменты времени t = 1, ..., n; W — матрица смежности орграфа, позволяющая моделировать изменение значений всех факторов.

Задача принятия решений заключается в анализе динамики изменения состояния системы,

представленной векторами состояния в последовательные моменты времени X(t),  $\forall t$  и их содержательной интерпретации. Содержательная интерпретация — это представление вектора состояния ситуации, полученного в процессе моделирования в некоторой другой системе  $\Psi$ :  $X(t) \to \vartheta$ , где  $\vartheta$  — интерпретирующая система. Под интерпретирующей системой понимается субъективная понятийная система лица, принимающего решение — его знания о предметной области и его интеллектуальные способности ( $\Psi$ ): рассуждение, обобщение, воображение, способные представить вектор состояния X(t) в виде понятия предметной области  $\vartheta$ , в которой модель построена.

Процесс интерпретации результатов моделирования достаточно грубой модели действительности в виде когнитивной карты в систему знаний субъекта (интерпретирующую систему) порождает содержательно более богатые когнитивные процессы в интеллекте человека. Процесс интерпретации результатов моделирования, полученных с помощью грубой модели и порождаемые при этом познавательные процессы в интеллекте человека, будем называть процессом когнитивного моделирования.

Интерпретация результатов моделирования важна при поддержке принятия решений в условиях неопределенности, поскольку корректная интерпретация позволяет: снизить неопределенность; обосновать правдоподобность результата моделирования (оценить адекватность модели); получить оценку прогноза в качественных терминах. При интерпретации прогнозов развития ситуаций (будущих состояний ситуации) важно увидеть признаки некоторого прецедента состояния. Это и будет интерпретанта прогноза — состояние реального объект, которое естественно может быть изучено более подробно, чем его грубая модель в виде когнитивной карты. В этом случае грубая когнитивная карта играет роль «стимулятора», позволяющего найти корректную интерпретацию результатов моделирования.

Для поддержки процесса интерпретации результатов моделирования, знания аналитика можно представить формально в виде онтологии как множество понятий предметной области, связанных множеством отношений, а его интеллектуальные способности как процедуры вывода в онтологиях. В условиях неопределенности онтология предметной области, отражая неполные и фрагментарные знания аналитика, также будет неполной и фрагментарной. В условиях дефицита вре-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Под онтологией здесь и далее понимается не общефилософская трактовка онтологии как учения о бытии, а определение онтологии в информатике как концептуальной схемы для формализации экспертных знаний [17].



мени на принятие решений построение подробной онтологии предметной области для решения задачи интерпретации оказывается нецелесообразным.

Еще одна проблема применения технологии моделирования и принятия решений с помощью когнитивных карт заключается в неоднозначности когнитивной карты для описания одного и того же явления действительности и соответственно множественности когнитивных карт одной и той же действительности у разных экспертов. Неоднозначность когнитивной карты приводит к неоднозначности интерпретации результатов моделирования и логического обоснования принимаемых решений разными экспертами, в разных контекстах принятия решений.

С проблемой неоднозначности интерпретации результатов когнитивного моделирования тесно связана проблема верификации модели и установления факта адекватности модели моделируемой действительности. В условиях грубости когнитивной модели решить эту проблему крайне затруднительно [3].

Вопросы верификации когнитивных карт исследовались в работах [18, 19]. Предлагаемые в них методы основаны на анализе типичных систематических ошибок, совершаемых разработчиками когнитивных карт. В частности, выделены риски, приводящие к ошибкам в когнитивных картах: риск ложной транзитивности и риск недопонимания математического смысла связей. Ложная транзитивность возникает при установлении причинно-следственного отношения между факторами разного уровня общности, что приводит к ошибкам в структуре когнитивной карты, а недопонимание математического смысла связей приводит к ошибкам в определении силы этих причинно-следственных связей. Авторы предлагают и методы снижения этих рисков: путем согласования уровней общности факторов, представленных в когнитивных картах, и применения вербальных шаблонов на этапе определения силы причинных связей.

В работе [20] проблему верификации когнитивных карт предлагается решать с помощью объяснения прогнозов развития ситуации. Объяснение прогнозов представляет собой описание последовательности процесса получения прогнозных значений факторов в виде цепочки сработавших в вершинах когнитивной карты правил, которые описывают моделируемые процессы, облегчая, таким образом, их понимание и, соответственно, верификацию структуры когнитивной карты.

В настоящей работе перечисленные проблемы когнитивного моделирования предлагается решать в рамках единого теоретического базиса, построенного на основе семиотического подхода [21—23].

Предлагается изменить существующую модель представления знаний в когнитивных картах в виде множества факторов и причинно-следственных отношений на этом множестве на ее представление в виде знаковой системы, т. е. на семиотическое представление когнитивных карт.

#### 1. ЗНАКИ И ЗНАКОВЫЕ СИСТЕМЫ, ПРИКЛАДНАЯ СЕМИОТИКА

### 1.1. Семиотические подходы в информатике и управлении

Исследованием знаков и знаковых систем занимались известные математики и логики при создании так называемой экстенциональной (объемной) логики [24]. Наибольший практический интерес представляют работы немецкого логика Г. Фреге. Его модель знака, известная как «треугольник Фреге», включает в себя три связанные составляющие: имя знака, смысл знака и значение (представление) знака (рис. 1). Имя знака 4 - это символ, слово (изображение), означающее в сознании человека объект реального мира (денотат 1). Под смыслом знака 3 Фреге понимает описание объекта реального мира, отличающего его от других объектов. И, наконец, под значением (представлением) знака, Фреге понимает ментальное представление реального объекта (денотата — означаемого I), которое определяется смыслом знака и его именем.

Известный американский логик и философ Ч. Пирс приводит классификацию знаков, выделяя знаки-образы (иконы) (изобразительные знаки, в которых означаемое и означающее подобны), знаки-индексы (означаемое указывает на признаки означающего) и знаки-символы (означаемое и означающее связаны меж собой в рамках некоторой конвенции, договоренностей) [25, 26]. Знаки-символы — это обычные слова, которые употребляются для описания действительности, коммуникации между людьми и т. д. Далее мы будем говорить о знаках-символах. Поясним знак-символ. Например, знак «прямоугольный треугольник» будет представлен тройкой: имя знака — «прямоугольный треугольных»; смысл знака — это

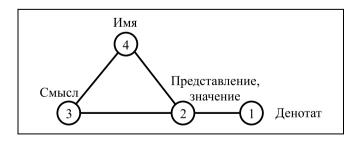


Рис. 1. Знак Г. Фреге



его признаки: плоская геометрическая фигура, ограниченная тремя сторонами, и один угол прямой; значение знака — это некоторый реальный прямоугольный треугольник или множество прямоугольных треугольников, например, изображенных на листе бумаги, экране монитора и др. Особенность знакового представления состоит в том, что все три составляющие знака связаны между собой и изменение одной из них приведет к изменению остальных. Например, если изменить имя знака, убрав слово прямоугольный, то имя знака будет — «треугольник». Это приведет к необходимости изменения смысла знака — нужно убрать признак «один угол прямой». Значение знака в этом случае также изменится и будет включать в себя не только всевозможные прямоугольные треугольники, но и непрямоугольные треугольники. В этом случае знак с именем «прямоугольный треугольник» будет разновидностью общего знака с именем «треугольник», т. е. между этими знаками существует отношение «род — вид». Это отношение между знаками нас будет интересовать в дальнейшем. Между знаками могут быть и другие виды отношений, образующие из отдельных знаков знаковые системы и описывающие наши знания о реальном мире с разной степенью детализации.

Особенность представления знаний в виде знаков и знаковых систем заключается в том, что знак связывает ментальные процессы, в которых принимают участие имя, смысл и значение знака, определяемые субъектом, с объектами реального мира — денотатами. Это означает, что между реальным миром и знаками существуют отношения моделирования, позволяющие осуществлять процесс мышления не с реальными объектами, а с их знаками. Так, основатель теоретической семиотики (науки о знаках и знаковых системах) Ч. Пирс считает, что: «У нас нет способности мыслить без помощи знаков» [25].

Исследованию знаковой природы человеческого мышления посвящено множество работ когнитивных психологов. Они исследуют вопросы организации ментальных пространств, в которых разворачиваются знаковые репрезентации реальной действительности, особенности строения понятийных пространств, взаимосвязи мышления и речи и др. Феномен знака, его роль в социальной сфере исследовались множеством известных философов, филологов, лингвистов. Например, в 1960—1980-х гг. в исследование семиотических систем в гуманитарных науках большой вклад внесла Тартуско-Московская семиотическая школа, объединившая Ю.М. Лотмана, А.М. Пятигорского и др.

В настоящей работе акцент сделан на вопросы применения знаков и знаковых систем в системах обработки, представления знаний в областях ин-

форматики, искусственного интеллекта, а также управления сложными системами.

Работы известного белорусского лингвиста В.В. Мартынова, посвященные вопросам применения семиотического подхода в кибернетике и информатике, признаны пионерскими. Его первая работа появилась 50 лет тому назад, в 1966 г. [27]. Он предложил несколько вариантов так называемого универсального семантического кода, позволяющего в строгой логической структуре представить смысл текстового сообщения [28].

В области систем управления семиотический подход развивался в рамках ситуационного подхода Д.А. Поспелова [21]. Ситуационный подход в управлении применяется в случаях трудно формализуемого объекта управления, его уникальности, неполноты описания, активности и др., когда нет возможности построить точную математическую модель объекта, но, тем не менее, объект может быть вербально грубо описан экспертами.

Идея ситуационного управления основана на двух гипотезах:

- всю информацию об объекте управления и способах управления им можно выразить на естественном языке:
- всякий текст на естественном языке, относящийся к тому, о чем говорится в первой гипотезе, можно перевести на формальный язык семиотической системы.

В рамках семиотического подхода в управлении был разработан язык ситуационного управления. Основу этого языка составляет его ядро или ядерная конструкция в виде тройки:  $x_i r_q x_j$ , где  $x_i$ ,  $x_j$  — это понятия, признаки понятий или их значения,  $r_q$  — отношения: классификационные  $r_1$  (иметь имя), признаковые  $r_2$  (иметь признак), количественные  $r_3$  (иметь значение), сравнения  $r_4$  (быть равным), принадлежности  $r_5$  (принадлежать классу), пространственные  $r_6$  (быть слева (справа) и др.), каузальные  $r_7$  (иметь причину или следствие) и др.

Такая конструкция языка с множеством отношений с использованием логических связок  $(\land, \lor, \neg, \rightarrow (u, или, не, импликация))$ , квантификаторов (общности  $\forall$  и существования  $\exists$ ), модальных операторов (возможно, вероятно и др.), позволяет формализовать описания на естественном языке достаточно сложных объектов управления.

В ситуационном управлении термин ситуация определяет состояние объекта управления в некоторый момент времени, требующее реакции на это состояние, т. е. акта управления. Акт управления в этом случае представляется в виде отображения:

$$S_i: Q_j \xrightarrow{U_{\iota}} Q_i$$

где  $S_i$  — полная ситуация (описание знаний о состояниях объекта управления и знаний о технологии управления объектом);  $Q_i$  — текущее состоя-



ние (описание текущего состояния ситуации);  $U_k$  — управляющее воздействие, применимое к текущему состоянию и вырабатываемое на основе знаний о технологии управления, которые содержатся в  $S_i$ ; состояние  $Q_i$  — описание состояния ситуации после применения управления  $U_k$ .

При создании системы ситуационного управления все возможные описания состояний объекта управления классифицируются, представляются в виде множества классов состояний  $S_i = \bigcup_k S_{ik}$ , причем каждому классу состояний  $S_{ik}$  ставится в соответствие управляющее воздействие  $U_k$ . Управление возможно, если описание текущей ситуации  $Q_j$  близко к описанию какого либо класса ситуаций  $S_{ik}$  и, следовательно, возможно одношаговое управление  $U_k$ . Как результат управляющего воздействия получаем описание нового состояния  $Q_i$ .

В рамках семиотического подхода в ситуационном управлении была предложена архитектура семиотической управляющей системы, возможные варианты реализации составных частей этой архитектуры, позволяющие представить описание объекта управления, законов его функционирования и методов управления, представленных на естественном языке, в семиотической модели, записанной в строгих формальных логико-лингвистических конструкциях.

Однако необходимость описания и классификации всех возможных состояний объекта, а также возможных управляющих воздействий делает этот подход трудно реализуемым для больших систем. Поэтому в рамках семиотического подхода рассматривались другие модели представления естественно-языковых описаний объекта управления. Одна из таких моделей привела к появлению нового направления в рамках ситуационного подхода — прикладной семиотики [22, 23].

Особенность прикладной семиотики заключается в том, что если в ситуационном управлении в описании объекта на естественном языке использовались слова — имена понятий (символов), обозначающих объект, то в прикладной семиотике описание строится с использованием знаков-символов в виде троек: имя, смысл и значение (представление) объекта, т. е. в виде знака в смысле треугольника Фреге. Таким образом, при формализации естественно-языковых предложений, описывающих объект, в модели объекта, кроме имени знака, появляются связанные с именем семиотическими отношениями смысл и значение (представление) объекта. В прикладной семиотике информационной единицей для описания ситуаций служит знак в виде тройки и называется он семой [22, 23]. Причем изменение любого элемента этой тройки, вызванное появлением новых фактов, изменяет два других элемента знака. В прикладной семиотике текущая семиотическая модель объекта управления представляется как одна из моделей из упорядоченного множества возможных семиотических моделей объекта управления — возможных миров. Таким образом, семиотические модели становятся открытыми и легко адаптируются к условиям изменяющейся среды.

К сожалению, монография «Прикладная семиотика» Д.А. Поспелова так и не была закончена, однако отдельные ее главы, в которых изложены основные идеи этого подхода, опубликованы [22, 23]. Работы в области семиотических систем продолжаются: разрабатываются модели и методы отдельных элементов архитектуры семиотической системы, множество работ посвящено исследованию адаптационных возможностей прикладных семиотических систем. В работе [29] предложена архитектура системы управления, построенной на принципах семиотического подхода. Эта архитектура включает в себя базу знаний о предметной области, множество моделей принятий решений и элементы (интерпретатор, классификатор, коррелятор, экстраполятор), обеспечивающие адаптацию существующей (текущей) базы знаний и моделей для решения оригинальной задачи.

В работе [30] предложена нечеткая семиотическая модель, состоящая из нечетких регуляторов и позволяющая их настройку на *Т*-нормы и модели конкретного пользователя. В работе [31] рассматриваются принципы построения семиотической системы поддержки принятия решений, в которой адаптация для решения проблемы осуществляется на основе учета опыта принятия решений в немарковской модели с обучением. В работе [32] основная идея автора заключается в объединении теоретической семиотики и эволюционного моделирования для моделирования процессов образования и эволюции знаков (*семиозиса*) в многоагентных системах.

В зарубежной литературе научное направление, исследующее применение знаков и знаковых систем в области информатики часто называют вычислительной семиотикой (computational semiotics) [33]. В большинстве работ применение семиотического подхода направлено на поддержку проектирования информационных систем. Так, в работе [34] предложена компьютерная семиотика (computer semiotics). Компьютерная семиотика базируется на тезисе Ф. Соссюра, классика теоретической семиотики [35], о том, что семиотика — это наука о знаках в социуме. Поэтому центром теории компьютерной семиотики является индивидуум как носитель знаковой системы. Тогда знаковая система в теории компьютерной семиотики может рассматриваться как формализованное знание индивидуума в виде знакового описания компьютерной



системы и ее отдельных элементов: интерфейсов; моделей представления знаний; языков программирования; мультимедийных и гипертекстовых приложений; организация коммуникации систем, коллективного поведения в мультиагентных системах и др.

В этом же ключе предлагается семиотический подход для классификации и разработки информационных систем [36]. Любая информационная система рассматривается в трех аспектах: синтаксическом, семантическом и прагматическом, которые являются тремя составными частями теоретической семиотики Ф. Соссюра [35]. Синтаксис отражает формальную знаковую модель информационной системы, выраженную с помощью знаков: блок-схем, имен подсистем и др. Семантика определяет связь знаков синтаксической структуры и реальных объектов (подсистем) информационных систем, которые эти знаки обозначают. Здесь может быть описано функциональное назначение подсистем, интерфейсов, алгоритмы их работы, особенности конструкции и т. д. Прагматика описывает отношение знаков, с помощью которых система описана, и конечного пользователя информационной системы в разных вариантах (контекстах) ее использования. Здесь затрагиваются вопросы человеко-машинного интерфейса, а также функциональность системы в целом и режимы ее использования.

Различные синтаксические, семантические и прагматические структуры позволяют классифицировать различные типы информационных систем (систем поддержки принятия решений, экспертные системы, системы групповой поддержки принятия решений, системы обработки транзакций и др.). Семиотическая классификация позволяет увидеть перспективы развития информационных систем, и, следовательно, сформулировать задачу на их разработку.

В работе [37] исследуется возможность применения семиотического подхода для проектирования пользовательских интерфейсов. Для этого разрабатывается теоретический подход, названный алгебраической семиотикой (algebraic semiotic). Суть его в следующем. Знаки, используемые для построения интерфейсов (кнопки, окна, надписи, тексты и т. д.), представлены в виде множества классов знаков  $\{S_i\}$ . Определены характеристики всех классов  $V_{ii}$  (свойства, например, цвет, размер и т. д.) и определен частичный порядок на множестве знаков ( $\{S_i\}$ ,  $\leq$ ). Это позволяет представить все классы по включению их свойств в виде иерархии на n уровнях. На каждом уровне n определен конструктор  $c_n$ , который позволяет создавать новые знаки для уровня n+1 из знаков, находящихся на уровнях n и n + 1. Существующие и вновь созданные знаки образуют частично упорядоченное множество знаковых систем, которые затем используются для разработки пользовательских интерфейсов.

Автор вводит понятие семиотический морфизм (semiotic morphism), подобное морфизму в теории категорий, для исследования возможности представления интерфейсов в разных, но эквивалентных знаковых системах. Например, если интерфейс разработан с преимущественным применением текстовых полей, то с помощью семиотического морфизма он может быть преобразован в интерфейс, содержащий изображения или иконки.

Понятие семиотический морфизм употребляется также для корректного объединения разных знаковых систем, представляющих интерфейсы. Их объединение направлено на расширение существующих интерфейсов.

В работе [38] рассмотрены возможные применения семиотического подхода при разработке гипертекстовых, мультимедийных и Интернет-приложений.

В международной базе цитирования «Scopus» на запрос «applied semiotics» за период с 2000 г. по настоящее время в областях «Computer Science» и «Engineering», было выявлено 145 докладов на конференциях и статей в периодических научных журналах. Судя по аннотациям этих работ, семиотический подход находит широкое применение для проектирования и анализа разного рода информационных систем, создания моделей знаний в прикладных областях. Однако строгих формальных моделей семиотической системы в проанализированных работах не встречалось. Единственное исключение, теоретическая модель — алгебраическая семиотика, описанная в работе [37]. В работе [38] отсутствие теоретических работ по прикладной семиотике связывают с ее «капризностью». Действительно, рассмотрение одного и того же знака в разных контекстах может означать разный смысл и обозначать разные объекты или явления реального мира. Эта «капризность» семиотики создает трудности при создании единой конструктивной теоретической модели семиотической системы в области компьютерных наук и информатики. Возможно, именно поэтому в настоящее время семиотический подход содержит в качестве элемента семиотической системы носителя знаковой системы — человека — и является скорее методологическим приемом, описывающим сложные системы в едином теоретическом базисе, направленным на поддержку человеко-машинного интерфейса для активизации интеллектуальной деятельности эксперта или аналитика в процессах анализа и принятия решений в сложных ситуациях.

Одна из теоретических моделей прикладной семиотики была в самом общем виде описана в работах [22, 23]. Рассмотрим эту модель.



#### 1.2. Семиотическая система Д.А. Поспелова

Семиотической системой *SS* называется упорядоченная восьмерка множеств [22, 23]:

$$SS = \langle T, R, A, P, \tau, \rho, \alpha, \pi \rangle$$

где T — множество основных символов, R — множество синтаксических правил, A — множество знаний о предметной области, P — множество правил вывода,  $\tau$  — правила изменения множества T,  $\rho$  — правила изменения множества R,  $\alpha$  — правила изменения множества R.

Первые четыре множества образуют формальную систему  $FS = \langle T, R, A, P \rangle$ , которая позволяет формально описать некоторый объект реальности для его моделирования. Элементы  $M_{FS} = (\tau, \rho, \alpha, \pi)$  — правила изменения формальной системы, которые обеспечивают ее адаптацию для решения проблем, которые в рамках формальной системы FS решить не удается.

Иными словами, семиотическая система в процессах поиска решения может быть определена как динамическая система:  $SS(t) = \langle FS_i(t), M_{FS_i}(t) \rangle$ , где  $FS_i(t)$  — текущая формальная система (модель реальности), а  $M_{FS_i}(t)$  — правила смены текущей формальной системы (модели).

Важно отметить, что правила  $M_{Fsi}=(\tau, \rho, \alpha, \pi),$  меняющие состояние формальной системы, связаны зависимостью, аналогичной зависимости, существующей в элементах семиотического треугольника (треугольника Фреге) [24]. Это означает, что применение одного из правил из этой четверки приводит к применению оставшихся правил. В работе [23] считается, что предложенная восьмерка, описывающая семиотическую систему, есть единое целое, которое определяется как знак. Конечно, в рамках формальной системы FS с помощью подобранного множества основных символов R и синтаксических правил T описывать сложные объекты можно тройками: имя знака, его смысл и представление денотата.

Для описания механизма взаимодействия элементов знака, изменяющего формальную систему, в работе [23] рассматривается множество знаков, связанных различными отношениями. В искусственном интеллекте такая сеть знаков называется семантической сетью и, по сути, соответствует некоторому вербальному описанию ситуации — состоянию объекта управления. Управление здесь заключается в изменении сети знаков таким образом, чтобы новая сеть знаков соответствовала некоторой цели управления, например, разрешению некоторого конфликта в ситуации. Поясним это на простом примере. Рассмотрим ситуацию в семье, в которой возник конфликт из-за желания жены приобрести собаку, что не устраивает мужа.

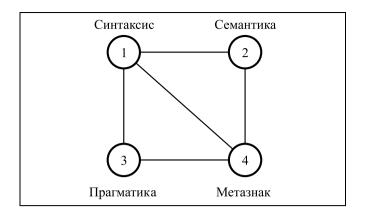


Рис. 2. Квадрат Поспелова

Эта ситуация может быть формально описана семантической сетью. Управление, направленное на разрешение конфликта, в этом случае заключается в том, чтобы убрать знак, вызывающий конфликт — это знаки собака, муж или жена. Соответственно решением этой ситуации служит новый знак, например, супруги договорились купить кошку или аквариумных рыбок, что устраивает всех, или еще одно решение — решили развестись.

Авторы говорят о внутренней активности знаковых сетей, для управления которой необходима надстройка над сетью знаков в виде метазнака. Метазнак определяет фрагмент сети знаков, над которым он надстроен. Структура метазнака отличается от знака в виде треугольника Фреге и определяется четверкой: синтаксис, который определяет имя метазнака, и синтаксические отношения между знаками во фрагменте сети знаков; семантика — понятия о знаке, определяющие основные признаки и особенности фрагмента сети знаков; прагматика — определяет процедуры, связанные с возможным изменением фрагмента сети знаков [23]. Другими словами, метазнак определяет синтаксис, семантику и прагматику фрагмента сети знаков, который он обозначает. Эту четверку принято называть семиотическим квадратом Поспелова (рис. 2).

Например, метазнак для ранее приведенного примера определится следующим образом. Сеть знаков муж, жена и собака с определенными отношениями является денотатом метазнака и обозначается в вершине «Синтаксис» именем — «Конфликт из-за собаки». В вершине «Семантика» будут описаны признаки этой конфликтной ситуации, ее суть, а в вершине «Прагматика» описаны возможные решения этого конфликта, например те, о которых говорилось ранее.

Метазнак (метауровень знаковой системы) можно рассматривать как некоторую управляющую систему над знаковой системой (фрагментом сети знаков), оценивающую ее текущее состояние



и предлагающую действия, направленные на ее изменение. По сути, это система, которая реализует правила смены формальной системы FS в случаях, когда такая смена становится необходимой, т. е. появляются условия активности.

В качестве одного из возможных условий активности в работе [23] рассматривается наличие во фрагменте знака, так называемого когнитивного диссонанса [39]. Фактически когнитивный диссонанс в знаковой системе — это конфликт (противоречие) в моделируемой системе.

Условия активности метазнака реализуются множеством правил вида [23]:

$$(C_i, A_i, H_i, B_i), i = 1, ..., n,$$

где  $C_i$  — имя продукции,  $A_i$  — условия активизации продукции,  $H_i$  — последствия активизации продукции,  $B_i$  — действия по изменению знака.

Разрешение конфликта основано на оценке  $H_i$  его последствий. В зависимости от этой оценки, конфликт разрешается действием  $B_i$ . Действие предполагает изменения самой семиотической системы (изменение ситуации и, следовательно, формальной системы  $FS_i$ ). Если конфликт считается несущественным, то формальная система остается неизменной до тех пор, пока не изменится оценка последствий конфликта.

Множество знаков, описывающих ситуацию в предметной области — это достаточно сложная многослойная иерархическая структура, в которой отношения «род — вид» между знаками на разных уровнях иерархии позволяют получать описание ситуаций с разной степенью общности, выделяя наиболее важные для решения задачи признаки. Активность метазнаков фрагментов сети знаков позволяет управлять сетью этих знаков для поиска решений. При этом решение будет выражено с помощью новой сети знаков [22].

Система представления знаний, состоящая из знаков, метазнаков и механизмов управления сетью знаков называется семиотической базой знаний [22].

Семиотическая база знаний отличается от обычной характером хранящейся информации (это знаки, метазнаки), а также встроенными механизмами перестройки семиотической базы знаний при решении практических задач. В работе [22] были сформулированы основные идеи прикладной семиотики, процедуры, реализующие функциональность семиотической базы знаний. Однако законченных реализаций идей семиотической системы управления и семиотической базы знаний на изложенных выше принципах не было. Интерес представляет защищенная в 2015 г. кандидатская диссертация, предлагающая модели и алгоритмы элементов знаковой картины мира субъекта, основанных на идеях прикладной семиотики [40].

В настоящее время элементы описанных идей построения семиотической базы знаний можно найти в онтологическом моделировании, в технологиях семантического WEB'а, в хранилищах информации, основанных на стандартах RDF-схем и др.

Отметим, что когнитивное моделирование в принятии решений, рассматриваемое в настоящей работе, попадает в класс систем ситуационного управления. Здесь мы имеем грубую модель действительности в виде ориентированного графа, которая считается гипотезой о функциональной структуре объекта управления и является формализацией естественно-языкового описания объекта управления. Можно сказать, что когнитивная карта — это однородная семантическая сеть с причинно-следственными отношениями. По сути, это сеть знаков, которая может быть представлена в терминах семиотической системы.

Цель настоящей работы заключается в разработке и исследовании теоретической модели семиотических когнитивных карт, элементом построения которых служит знак в виде тройки: имя, смысл и значение.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В первой части статьи рассмотрены трудно решаемые проблемы когнитивного моделирования и принятия решений в плохо определенных ситуациях. Это проблемы интерпретации результатов моделирования ситуаций и верификации моделей ситуации, которые предложено решать на основе нового теоретического базиса когнитивного моделирования ситуаций, основанного на принципах прикладной семиотики.

Проанализированы существующие в настоящее время семиотические подходы и модели проектирования, анализа, принятия решений в областях информатики и управления.

Подробно рассмотрена формальная семиотическая модель ситуаций Д.А. Поспелова, включающая описание ситуации как формальной системы и модификаторы этой формальной системы, позволяющие перестраивать ее в процессах принятия решений. Эта модель в дальнейшем взята за основу для формализации семиотических когнитивных карт.

Далее будут рассмотрены основные определения терминов и понятий модели семиотических когнитивных карт, а также алгоритм построения интерпретирующего каркаса предметной области, предназначенного для облегчения решения задач интерпретации результатов моделирования и верификации когнитивных моделей в процессах принятия решений в плохо определенных предметных областях, с применением методологии когнитивного моделирования.



#### **ЛИТЕРАТУРА**

- Часто цитируемые статьи журнала «Проблемы управления». URL: http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml? jrnid=pu&wshow=statlist&option\_lang=rus&speriod=alltime#r6 (дата обращения: 9.04.2015).
- 2. *Кулинич А.А.* Классификация когнитивных карт и методы их анализа. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте // Сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф. (Коломна, 16—19 мая 2011 г.). М., 2011. Т. 1. С. 124—136.
- 3. *Кулинич А.А.* Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2010. N2 3. C. 2—16.
- Кулинич А.А. Компьютерные системы анализа ситуаций и поддержки принятия решений на основе когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. — 2011. — № 4. — С. 31—45.
- 5. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И. Когнитивный подход в управлении // Проблемы управления. 2007. № 3. С. 2—8.
- Кузнецов О.П. Интеллектуализация поддержки управляющих решений и создание интеллектуальных систем // Проблемы управления. 2009. № 3.1. С. 64—72.
- Новиков Д.А. «Когнитивные игры»: линейная импульсная модель // Проблемы управления. — 2008. — № 3. — С. 14—22.
- Куливец С.Г., Коргин Н.А. Модель информационного управления на основе игры на линейной когнитивной карте // Управление большими системами. 2011. Вып. 35. С. 94—113.
- Кулинич А.А. Модель поддержки принятия решений для образования коалиций в условиях неопределенности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 2. С. 95—106.
   Рябов В.Б. Управление качеством трудовой жизни в органи-
- 10. Рябов В.Б. Управление качеством трудовой жизни в организации с использованием когнитивных карт // Экспериментальная психология. 2013. Т. 6, № 3. С. 110—121.
- Соседов Г.А. Менеджмент качества системы образования // Наука и бизнес: пути развития. — 2013. — № 1 (19).
- 12. *Канаева Е.И*. Когнитивное моделирование риска нештатного падения отделяющейся части ракеты-носителя // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 3 (76). С. 79—87.
- 13. Фадеев В.А. Формализация проблемы развития генерирующих мощностей в изолированном районе // Тр. Братского гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 61—64.
- 14. Башлыков А.А. Принципы построения перспективных корпоративных информационных систем интеллектуальной поддержки принятия решений в управлении и бизнесе транспорта нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 8. С. 9—19.
- 15. Авдонин Б.Н., Хрусталев Е.Ю., Хрусталев О.Е. Когнитивная методология структуризации знаний для изучения и применения финансово-экономических инноваций // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2013. № 35. С. 2—13.
- 16. Papageorgiou E.I. A Review study on Fuzzy Cognitive Maps and their applications during the last decade // Proc. of IEEE Intern. Conf. of Fuzzy Systems (FUZZ IEEE). 2011, 27—30 June. Taipei, Taiwan. P. 828—835.
- Gruber T.A Translation approach to portable ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5 (2). P. 199—220.
- Абрамова Н.А., Коврига С.В. О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 60—67.
- 19. Абрамова Н.А., Коврига С.В. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт // Проблемы управления. 2008. № 6. С. 23—33.
- Кулинич А.А. Верификация когнитивных карт на основе объяснения прогнозов // Управление большими системами. — 2010. — Вып. 30.1. — С. 453—469.

- Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
- 22. *Поспелов Д.А.*, *Осипов Г.С.* Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. 1999. № 1. С. 9—35.
- 23. Осилов Г.С. От ситуационного управления к прикладной семиотике // Там же. 2002. № 6. С. 56—59.
- Бирюков Б.В. Теория смысла Готлоба Фреге / В кн.: Применение логики в науке и технике. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 502—555. URL: http://www.rulit.me/books/teoriya-smysla-gotloba-frege-read-262511-3.html (дата обращения 3.11.2015).
- 25. *Peirce C.S.* Questions Concerning Certain Faculties Claimed for Man // Journal of Speculative Philosophy. 1868. Vol. 2. P. 103—114. URL: http://www.peirce.org/writings/p26.html (дата обращения: 9.04.2015).
- 26. Пирс Ч.С. Что такое знак? // Вестник Томского гос. ун-та. Философия. Социология. Политология. 2009. № 3 (7). С. 88—95.
- 27. *Мартынов В.В.* Кибернетика. Семиотика. Лингвистика. Минск: Изд-во БГУ, 1966. 275 с.
- Мартынов В.В. Основы семантического кодирования.
   Опыт представления и преобразования знаний. Минск: ЕГУ, 2001. 140 с.
- 29. Эрлих А.И. Прикладная семиотика и управление сложными объектами // Программные продукты и системы. 1997. № 3. С. 2—6.
- Аверкин А.Н., Головина Е.Ю. Нечеткая семиотическая система управления // Тр. междунар. конф. «Интеллектуальное управление: новые интеллектуальные технологии в задачах управления (ICIT'99)». Переславль-Залесский 6—9 дек. 1999 г. М., 1999. С. 141—145.
- 31. *Еремеев А.П.*, *Тихонов Д.А.*, *Шутова П.В.* Поддержка принятия решений в условиях неопределенности на основе немарковской модели // Изв. РАН: Теория систем и управления. 2003. № 5. С. 75—88.
- 32. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
- Gudwin R.R. From semiotics to computational semiotics. In Proc. of the 9th International Congress of the German Society for Semiotic Studies / 7th International Congress of the International Association for Semiotic Studies (IASS/AIS). — Dresden, 1999.
- Andersen P.B. A Theory of Computer Semiotics: Semiotic Approaches to Construction and Assessment of Computer Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 460 p.
- 35. *Соссюр* Ф. де Курс общей лингвистики. Пер. с фр. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 256 с.
- Barron T.M., Chiang Roger H.L., Storey V.C. A semiotics framework for information systems classification and development // Decision Support Systems. 1999. N 25. P. 1—17.
- Goguen J. An Introduction to Algebraic Semiotics, with Applications to User Interface Design // Computation for Metaphor, Analogy and Agents, ed. by Ch. Nehaniv, Springer Lecture Notes in Artificial Intelligence. 1999. Vol. 1562. P. 242—291.
- Neumueller M. Hypertext Semiotics in the Commercialized Internet. Diplomarbeiten Agentur diplom. de (January 1, 2001). P. 236. URL http://sammelpunkt.philo.at:8080/23/2/ht\_semiotics.pdf (дата обращения: 17.09.2015).
- Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. СПб.: Ювента, 1999. — 318 с.
- 40. Панов А.И. Исследование методов, разработка моделей и алгоритмов формирования элементов знаковой картины мира субъекта деятельности: Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: ВЦ РАН, 2015. 22 с. http://vak2.ed.gov.ru/idcUploadAutoref/renderFile/193573 (дата обращения: 21.08.2015).

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

**Кулинич Александр Алексеевич** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ⋈ kulinich@ipu.ru. УДК 519.876.2

## МОДЕЛИ ТОЛЕРАНТНОГО ПОРОГОВОГО ПОВЕДЕНИЯ (от Т. Шеллинга — к М. Грановеттеру)

В.В. Бреер

Рассмотрены модели толерантности, берущие начало с работы Т. Шеллинга. Показано, что толерантное пороговое поведение, включая исходную модель Шеллинга, можно свести к модели М. Грановеттера с определенной функцией распределения порогов. Исследована модель, описывающая конкуренцию внутри группы одновременно с абсолютной симпатией к противоположной группе — своего рода «толерантность наоборот». Эти же два типа поведения изучены в непрерывном времени, для которого дополнительно учтены эффекты забывания и запаздывания, приводящие к затухающим и незатухающим колебательным процессам.

**Ключевые слова:** толерантность, модель ограниченного окружения, модель Шеллинга, модель Грановеттера.

#### ВВЕДЕНИЕ

Работа Т. Шеллинга [1] дала толчок к исследованию моделей толерантного порогового поведения, таких как модель пространственного соседства (spatial proximity model) и модель ограниченного окружения (bounded-neighborhood model). Heсколькими годами позже М. Грановеттер опубликовал работу [2], в которой изучается модель порогового конформного поведения. Это работа также стала классической для развития моделей конформного поведения. Подробное описание этих моделей и их последующего развития можно найти в обзорах [3—5]. Модели Шеллинга используются, например, в изучении поведения этнических групп [6] и сегрегации в районе проживания [7]. Модель порогового поведения Грановеттера используется, например, при описании психологических аспектов принятия решений [8] и поведении толпы [9].

Общим для обеих моделей является понятие социального порогового взаимодействия, которое можно определить следующим образом: — у агента существуют только два выбора: действовать или бездействовать; — социальное взаимодействие означает, что агент, осуществляя свой выбор, учитывает поведение других агентов — так называемое социальное давление; — у агента есть своя инди-

видуальность в виде собственного порога: если социальное давление больше этого порога, то агент действует, иначе — бездействует.

Математические модели социального порогового взаимодействия формулируются либо в виде рекуррентного соотношения для функции распределения порогов в дискретном времени, либо в виде системы дифференциальных уравнений в непрерывном времени, либо в виде теоретико-игровой модели [10, 11]. Здесь мы будем рассматривать только первые две формулировки.

В настоящей статье доказывается эквивалентность модели ограниченного окружения Шеллинга и модели порогового поведения Грановеттера с соответствующей функцией распределения порогов. Кроме того, исследуются свойства положений равновесия для параметрически заданной функции распределения в дискретном и непрерывном времени.

Структура изложения. В § 1 изучается общая модель толерантного порогового поведения (ТПП) двух групп агентов в дискретном времени. Ключевым ее примером служит «модель ограниченного соседства» Шеллинга. После формального описания этой модели доказывается утверждение о том, что она эквивалентна рекуррентной процедуре пороговой модели Грановеттера с конструктивно получаемой функцией распределения порогов. Для классического примера модели ограниченного со-



седства показывается, что ее положения равновесия совпадают с положениями равновесия модели ТПП. Для изучения различных видов равновесия модели ТПП в качестве функции распределения вводится бета-функция, имеющая два параметра. Эти параметры имеют ясные содержательные интерпретации в рамках модели ТПП. В конце § 1 изучается зависимость положений равновесия от еще одного параметра — соотношения количеств агентов в разных группах.

В § 2 изучается динамическая модель внутренне конкурентного порогового поведения (ВКПП) двух групп агентов в дискретном времени. Эта модель является «противоположной» к модели ТПП в том смысле, что агенты проявляют различную степень толерантности по отношению к агентам своей группы, тогда как к чужой группе они проявляют абсолютную симпатию. Как и в модели ТТП, находится эквивалентная модель Грановеттера, для которой изучаются различные виды положения равновесия в зависимости от параметров.

В § 3 обосновывается переход в моделях ТПП и ВКПП к непрерывному времени. Положения равновесия этих моделей в дискретном и непрерывном времени совпадают, тогда как для модели ВКПП устойчивости в дискретном случае нет, а в непрерывном она имеет место. В § 4 изучаются модифицированные модели ВКПП в непрерывном времени, в которых учитываются факторы субъективного восприятия агентов: забывание и запаздывание принятия решения. Для модели ВКПП с забыванием приводится пример параметров, когда ее положение равновесия совпадает с исходной, не модифицированной моделью, но при этом возникает переходный процесс. Для модели ВКПП с запаздыванием субъективные представления агента не совпадают с реальностью и, при определенных значениях параметра, устойчивого равновесия не существует, а наблюдается циклический процесс.

В Заключении подводятся итоги и указываются перспективные направления дальнейших исследований.

#### 1. МОДЕЛЬ ТОЛЕРАНТНОГО ПОРОГОВОГО ПОВЕДЕНИЯ ДВУХ ГРУПП АГЕНТОВ В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ

**Модель ограниченного соседства** (Bounded neighborhood model). Следуя содержательной модели Т. Шеллинга [1], рассмотрим два множества — «зеленых» и «синих» *агентов*, у которых есть вы-

бор: проживать совместно по соседству (neighborhood) в данном районе или выбрать альтернативные места проживания. Агенты одного и того же цвета уживаются (мирно проживают рядом друг с другом) без каких-либо ограничений. К агентам другого «цвета» каждый агент относится с разной степенью толерантности, что выражается в терпимости к определенному количеству агентов другого цвета, проживающих в районе.

Степень толерантности агента характеризуется *порогом* толерантности к агентам другого цвета. Это пороговое поведение можно описать следующим образом: если *число* агентов другого цвета не превышает этого порога, то его устраивает такое соседство. В противном случае агент выбирает альтернативные места проживания. Построим формальную модель, описывающую динамику долей агентов двух цветов, уживающихся друг с другом. Начнем с простейшего случая — конечного числа агентов, принимающих решения в дискретном времени.

Обозначим конечное множество «зеленых» агентов через G, их количество  $n_G = |G|$ . Конечное множество «синих» агентов обозначим через B (количество  $n_B = |B|$ ). Будем считать, что  $x \in [0, \infty)$  равно отношению числа синих к числу зеленых, уживающихся друг с другом. Пусть  $\hat{F}_G \colon [0, \infty) \to [0, 1]$  и  $\hat{F}_B \colon [0, \infty) \to [0, 1] -$  функции распределения порогов толерантности зеленых и синих агентов соответственно. В момент времени  $k \in \{0, 1, 2, ...\}$   $x = x^{(k)} \in [0, \infty)$ .

По определению функции распределения,  $\hat{F}_G(x^{(k)})$  — это доля зеленых агентов, у которых порог толерантности не превышает  $x^{(k)}$ . Тогда доля  $1-\hat{F}_G(x^{(k)})$  зеленых агентов будет готова уживаться с синими на следующем шаге. Доля  $1-\hat{F}_B(1/x^{(k)})$  синих агентов также готова терпеть отношение  $1/x^{(k)}$  зеленых к синим. Таким образом, на шаге k+1 отношение уживающихся «синих к зеленым»

$$x^{(k+1)} = \frac{n_B \left[ 1 - \hat{F}_B \left( \frac{1}{x^{(k)}} \right) \right]}{n_W [1 - \hat{F}_G(x^{(k)})]}.$$
 (1)

Бесконечные интервалы области определения функций распределения не совсем удобны для параметрического анализа рекуррентной процедуры (1), поэтому перейдем к относительным долям проживающих вместе агентов. Для этого сделаем замену переменных, обозначив  $y = \frac{1}{1+x} \in [0, 1]$ .

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В оригинале [1] агенты — белые и черные, что подчеркивало проблематику расовых взаимоотношений в США. Мы будем придерживаться в этом смысле более нейтральной «цветовой» классификации.



Очевидно, что y характеризует долю синих в числе всех уживающихся агентов. Учитывая, что x = y/(1-y), перепишем рекуррентное соотношение (1) в виде:

$$\frac{y^{(k+1)}}{1-y^{(k+1)}} = \frac{n_B \left[1 - \hat{F}_B \left(\frac{1-y^{(k)}}{y^{(k)}}\right)\right]}{n_G \left[1 - \hat{F}_G \left(\frac{y^{(k)}}{1-y^{(k)}}\right)\right]}.$$
 (2)

Обозначим  $R_{G/B}=\frac{n_G}{n_B},\ F_G:\ [0,\ 1] \to [0,\ 1],$   $F_R:[0,\ 1] \to [0,\ 1]:$ 

$$F_G(y) = \hat{F}_G\left(\frac{y}{1-y}\right), \quad F_B(y) = \hat{F}_B\left(\frac{y}{1-y}\right), \quad (3)$$

$$F_{GB}(y) = \frac{1 - F_B(1 - y)}{R_{G/B}(1 - F_G(y)) + 1 - F_B(1 - y)}.$$
 (4)

Так как мы перешли от абсолютных значений численностей агентов к их отношениям, то будем считать, что как функция (4), так и ее аргументы могут принимать не только рациональные, но и действительные значения. Это допущение вполне обоснованно для большого количества агентов.

**Утверждение 1.** Уравнение (2) эквивалентно уравнению

$$x^{(k+1)} = F_{GB}(y^{(k)}), (5)$$

причем, если функция  $\hat{F}_{B}(\cdot)$  непрерывна, то  $F_{GB}(\cdot)$  является некоторой функцией распределения.  $\blacklozenge$ 

Доказательство утверждения 1 приведено в Приложении.

Таким образом, модель Шеллинга сведена к модели Грановеттера с функцией распределения порогов  $F_{GB}(\cdot)$ . Положениями равновесия динамической системы (5) являются точки множества  $ES = \{y \in [0, 1] | y = F_{GB}(y) \}$ , причем устойчивыми (асимптотически устойчивыми) будут положения равновесия из множества

$$SES = \{ y^* \in ES | \forall \varepsilon > 0 \exists K \ge 0:$$
  
$$\forall k \ge K \to |y^{(k)} - y^*| < \varepsilon \}.$$
 (5)

Покажем, как параметры исходных распределений порогов толерантности влияют на положения равновесия динамической системы (5). Для этого воспользуемся соответствующими диаграммами Ламерея.

**Пример 1.** Начнем с описанного Шеллингом [1] примера, в котором исследуется случай распределения по-

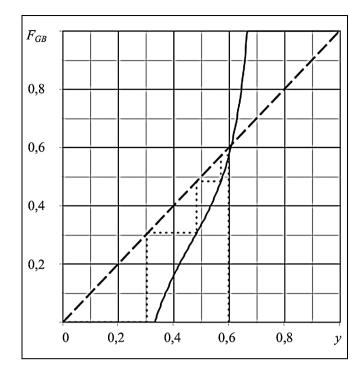


Рис. 1. Диаграмма Ламерея процедуры (5) для функций распределения (7),  $y_0=0.6$ 

рогов отношения «чужие к своим» в окрестности проживания в виде

$$\hat{F}_G(x) = \hat{F}_B(x) = \begin{cases} 0.5x, 0 < x \le 2, \\ 1, 2 < x. \end{cases}$$
 (6)

В работе [1, *с.* 169] графически были найдены три положения равновесия — 0 (устойчивое),  $\infty$  (устойчивое) и  $x \approx 1,5$  (неустойчивое). Преобразовав функцию (6) в соответствии с выражением (3), получим:

$$F_G(y) = F_B(y) = \begin{cases} \frac{y}{2(1-y)}, & y \le \frac{2}{3}, \\ 1, & y > \frac{2}{3}. \end{cases}$$
 (7)

Подставляя в уравнение (5) выражение (7) и  $R_{G/B}=2$ , получим диаграмму Ламерея, изображенную на рис. 1. Видно, что существуют два устойчивых положения равновесия — 0 и 1, что соответствует 0 и  $\infty$  для функций распределения (6), и одно неустойчивое положение равновесия  $y \approx 0,61$ , что соответствует  $x \approx 1,5$ . Таким образом, модели с параметрами [1, x. 169] и (5) совпадают (дают одинаковые результаты). •

Рекуррентная процедура (5) позволяет проводить качественный и количественный анализ равновесий для более общих видов функции распределения, чем описанные в работе [1]. Для иллюстрации различных случаев равновесия удобно использовать двухпараметрическую функцию, на-

**\$** 

Таблица 1 Различные виды распределения порогов толерантности

α, β	График $B(\cdot; \alpha, \beta)$	Описание распределения порогов толерантности группы
$\alpha < 1$ $\beta > 1$	0.8 0.6 0.4 0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1	Пороги сосредоточены в области малых значений. Низкая толерантность группы, т. е. <i>неприязнь</i> к чужим (ксенофобия)
$\alpha > 1$ $\beta > 1$	1 0.8 0.6 0.4 0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1	Пороги сосредоточены в средней области значений. Средняя толерантность группы, т. е. настороженность к чужим
$\alpha < 1$ $\beta < 1$	0.8 0.6 0.4 0.2 0.2 0.4 0.6 0.8 1	Пороги сосредоточены в области малых и больших значений. Смешанная толерантность, т. е. группа расколота на две подгруппы, одна из которых симпатизирует чужим, а другая испытывает к ним неприязнь
$\alpha > 1$ $\beta < 1$	0.8 0.6 0.4 0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1	Пороги сосредоточены в области больших значений. Высокая толерантность группы, т. е. симпатия к чужим

пример, — бета-распределение, задаваемое соотношением:

$$B(x; \alpha, \beta) = \frac{\int_{0}^{x} y^{\alpha - 1} (1 - y)^{\beta - 1} dy}{\int_{0}^{1} y^{\alpha - 1} (1 - y)^{\beta - 1} dy},$$
где  $\alpha > 0, \beta > 0.$  (8)

В табл. 1 приведены графики бета-распределения при различных значениях параметров, а также соответствующие интерпретации порогов толерантности произвольной группы агентов.

В табл. 2 приведены графики функции  $F_{G/B}(\cdot)$  для различных пар характерных значений параметров ( $\alpha_G$ ,  $\beta_G$ ) и ( $\alpha_B$ ,  $\beta_B$ ), где в качестве функций распределения порогов взято бета-распределение (8) и  $R_{G/B}=0,5$ . Устойчивые положения равновесия изображены крупными точками, а примеры диаграмм Ламерея (для определенных начальных условий) — пунктирной линией.

Если разделить табл. 2 на четыре квадранта (см. жирные линии) и пронумеровать их, двигаясь из правого верхнего против часовой стрелки, то можно увидеть следующие закономерности.

1. В квадранте II существуют два крайних положения равновесия (0 или 1). Это соответствует

Графики функции  $F_{gg}(\bullet)$  и положения равновесия для различных значений параметров

Таблица 2

$R_{G/B} = 0.5$	$\alpha_B < 1, \beta_B > 1$	$\alpha_B > 1, \beta_B > 1$	$\alpha_B \leq 1, \ \beta_B \leq 1$	$\alpha_B > 1, \beta_B < 1$
$\alpha_G < 1$ $\beta_G > 1$				
$\alpha_G > 1$ $\beta_G > 1$				
$\alpha_G < 1$ $\beta_G < 1$		of the same of the		
$\alpha_G > 1$ $\beta_G < 1$			and the second	



случаю, когда коэффициент  $\beta$  для обеих групп агентов больше единицы, т. е. (согласно табл. 1 в группах существует низкая или средняя толерантности). То, к какому положению равновесия сойдется процесс, зависит от начальных условий.

- 2. В квадранте I устойчиво положение равновесия 1, т. е. зеленые не уживаются с синими и выбирают альтернативные места проживания. В данном случае зеленые относятся к синим с настороженностью или неприязнью ( $\beta_G > 1$ ), а синие частично или полностью им симпатизируют ( $\beta_B > 1$ ). Число положений равновесия и их координаты в нижних двух графиках этого квадранта зависят от  $R_{G/B}$ . Эти случаи мы рассмотрим в § 4.
- 3. В квадранте III левые два графика соответствуют единственному положению равновесия 0. Этот случай симметричен случаю, рассмотренному в § 1.
- 4. Устойчивые положения равновесия, когда по соседству живут агенты разных цветов, сосредоточены в четвертом квадранте, т. е. это имеет место, когда обе группы расколоты или симпатизируют друг другу (см. табл. 1).
- 5. Два правых графика квадранта III также имеют внутреннее положение устойчивого равновесия. Но возникновение этого положения равновесия зависит от параметра  $R_{G/B}$ , т. е. соотношения общего числа агентов из разных групп. Зависимость положений равновесия y: $F_{GB}(y) = y$  от этого параметра для правого верхнего графика квадранта III иллюстрирует рис. 2. Как видно, для  $R_{G/B} \ge 1$  существует одно устойчивое положение равновесия 0, т. е. в районе остаются только зеленые агенты. Для других значений  $R_{G/B}$  положений равновесия будет больше. Так же будут зависеть от параметра  $R_{G/B}$  положения устойчивого равновесия для двух нижних графиков квадранта I.

На рис. 2 изображен график двумерной поверхности  $F_{GB}(\cdot)$ , зависящей от относительного числа синих агентов y и отношения количеств зеленых к синим  $R=R_{G/B}$ . Эту поверхность пересекает диагональ, выделенная более светлым оттенком серого. На рисунке видно геометрическое место точек пересечения функции  $F_{GB}(\cdot)$  с диагональю, для каждого фиксированного  $R_{G/B}$ . Если  $R_{G/B}<1$ , то существует четыре положения равновесия динамической системы, при  $R_{G/B}=1$  — три, а при  $R_{G/B}>1$  — два. Устойчивость этих положений равновесия будет определяться, каким образом линия  $F_{GB}(\cdot)$  пересекает диагональ: если сверху-вниз, то положение устойчиво, а если снизу-вверх, то неустойчиво.

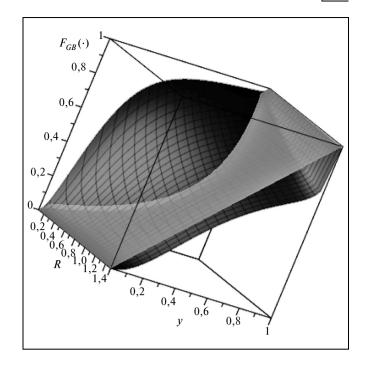


Рис. 2. График функции  $F_{GB}(\cdot)$  в зависимости от y и параметра  $R=R_{G/B}$ 

В данной модели мы рассмотрели динамику поведения, когда агенты настроены с разной степенью толерантности по отношению к членам чужой группы, причем «своих» они воспринимают абсолютно дружественно. Но может существовать и обратная ситуация, к изучению которой мы перехолим.

## 2. МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕ КОНКУРЕНТНОГО ПОРОГОВОГО ПОВЕДЕНИЯ ДВУХ ГРУПП АГЕНТОВ В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ

Рассмотрим теперь противоположную, в некотором смысле, модель, когда «толерантность» проявляется по отношению к своему цвету. Здесь базовым примером может быть следующая «экономическая» интерпретация. Предположим, что цвета характеризуют группы производителей, причем производители одного цвета выпускают замещающие типы продукции, т. е. являются конкурентами. Агенты другого цвета являются потребителями их продукции. Соответственно, каждый производитель может «терпеть» не более определенного числа конкурентов, иначе, ожидая перепроизводства, он уходит на другой рынок. Потребители также терпят определенное число других потребителей, и в случае ожидаемого дефицита уходят на другие рынки.



так и производителей  $\beta_B > 1$ , что может иметь место в ситуации повышенных рисковых ожиданий. Оказывается, что в этом случае равновесие неустойчиво, и процесс (13) переходит в цикл.

- 2. Так же есть две пары значений параметров, когда существует циклическое решение это левые два графика квадранта І. Но, как и в случае п. 5 (см. § 1, пояснения к табл. 2), такое поведение зависит от соотношения числа синих и зеленых агентов  $R_{G/B}$ . При других значениях этого параметра цикла может и не быть, как видно из симметричных двух правых графиков квадранта ІІІ, где в указанном случае преобладания производителей над покупателями ( $R_{G/B} = 2$ ) и терпимости производителей к конкуренции ( $\beta_G < 1$ ), равновесие устойчиво.
- 3. В квадранте IV равновесие устанавливается относительно быстро (мало шагов диаграммы Ламерея). Это объясняется низким уровнем неприязни внутри групп покупателей и продавцов  $\beta_G < 1$  и  $\beta_G < 1$ , который в свою очередь является следствием их уверенности в дальнейшем продолжении бизнеса (низкие рисковые ожидания).

Мы рассмотрели случай, когда все агенты *одновременно* в каждый момент времени принимают решение. Если же решения принимаются не одновременно, то полезно рассмотреть модель в непрерывном времени, к чему мы и переходим.

#### 3. МОДЕЛИ ДВУХ ГРУПП АГЕНТОВ В НЕПРЕРЫВНОМ ВРЕМЕНИ

Рассмотрим модель, когда изменения действий агентов происходит не одновременно. Так, пусть в момент времени величина  $y_n^{(k)}$  есть доля действующих на шаге k синих агентов относительно всего количества агентов  $n=n_G+n_B$ . На следующем шаге k+1 доля намеревающихся действовать равна  $F_{GB}(y_n^{(k)})-y_n^{(k)}$  для модели ТПП и  $Q_{GB}(y_n^{(k)})-y_n^{(k)}$  для модели ВКПП. Но они реализуют свое намерение не одновременно, а в среднем один агент исполняет свое намерение на интервале времени [k, k+1]. Тогда можно записать

$$\begin{split} y_n^{(k+1)} - y_n^{(k)} &= \frac{1}{n} [F_{GB}(y_n^{(k)}) - y_n^{(k)}], \\ y_n^{(0)} &= y_0 \in [0, 1], \\ y_n^{(k+1)} - y_n^{(k)} &= \frac{1}{n} [Q_{GB}(y_n^{(k)}) - y_n^{(k)}], \\ y_n^{(0)} &= y_0 \in [0, 1], \end{split}$$

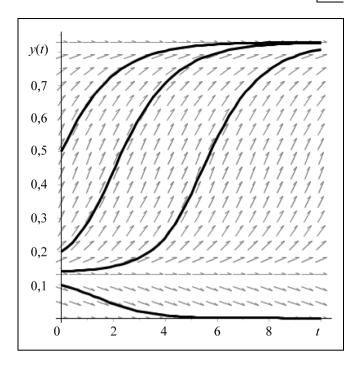


Рис. 3. Фазовый портрет модели ТПП для  $\alpha_G < 1$  ,  $\beta_G < 1$  и  $\alpha_B > 1$  ,  $\beta_R > 1$ 

где  $F_{GB}$  и  $Q_{GB}$  определяются выражениями (4) и (9) соответственно.

Для большого числа агентов  $n \gg 1$  получаем модели в непрерывном времени  $t \in [0, \infty)$  (это можно показать строго, но здесь мы не будем приводить доказательства):

$$\dot{y} = F_{GB}(y) - y, \quad y_0 \in [0, 1],$$
 (11)

$$\dot{y} = Q_{GB}(y) - y, \quad y_0 \in [0, 1].$$
 (12)

Для моделей ТПП и ВКПП в дискретном (5), (10) и непрерывном (11), (12) времени положения равновесия совпадают, так как и в том, и в другом случае они определяются уравнением  $F_{GB}(y)=y$  (для модели ВКПП  $Q_{G/B}(y)=y$ ).

Пример 2. Для модели ТПП с бета-распределениями (8)  $\alpha_G < 1$ ,  $\beta_G < 1$  и  $\alpha_B > 1$ ,  $\beta_B > 1$  эскиз фазового портрета представлен на рис. 3. Жирные линии соответствуют траекториям модели ТПП с различными начальными условиями. Как видно из этого рисунка, положения равновесия совпадают с равновесиями системы в дискретном времени (см. табл. 2).

Для модели ВКПП условия устойчивости равновесий отличаются в случае дискретного и непрерывного времени при одних и тех же параметрах ( $\alpha_G > 1$ ,  $\beta_G > 1$  и  $\alpha_B < 1$ ,  $\beta_B < 1$ ). Это видно из рис. 4 и 5. Например, на рис. 4 диаграмма Ламерея показывает, что равновесие циклично, тогда как на рис. 5 линии фазового портрета



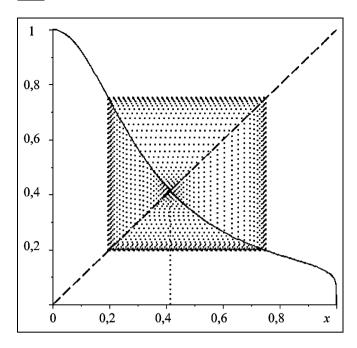


Рис. 4. Цикл модели ВКПП в дискретном времени

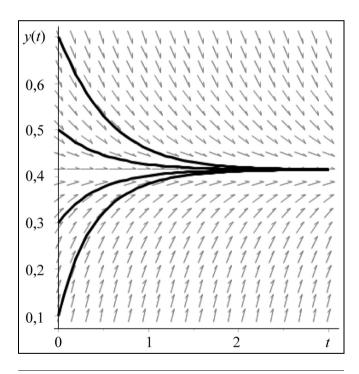


Рис. 5. Устойчивость модели ВКПП в непрерывном времени

сходятся к единственному положению равновесия (жирными линиями изображены несколько траекторий с соответствующими начальными условиями). ◆

Рассмотрим теперь варианты модели ВКПП, когда агенты воспринимают долю действующих субъективно.

## 4. МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕ КОНКУРЕНТНОГО ПОРОГОВОГО ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ С СУБЪЕКТИВНЫМ ВОСПРИЯТИЕМ

Модифицируем модель ВКПП (12), добавив фактор субъективности восприятия агентами доли соседствующих синих агентов. Так, пусть доля  $y_t$  синих агентов воспринимается всеми (и синими, и зелеными) агентами усредненной за все предшествующее время:

$$z_{t} = \int_{0}^{t} h(t - s)y(s)ds / \int_{0}^{t} h(t - s)ds,$$
 (13)

где  $h(\cdot)$  — некоторая функция усреднения, например, учитывающая забывание  $h(s) = e^{-\alpha s}$  ( $\alpha$  — коэффициент забывания) или выделяющая в предыстории определенный момент времени (запаздывание реакции)  $h(s) = se^{-\alpha s}$ . Если агенты действуют с учетом субъективно воспринимаемой доли агентов (13), то модель (12) следует переписать в виде

$$\dot{Y}_t = Q_{GR}(z_t) - Y_t, \quad Y_0 \in [0, 1],$$
 (14)

где  $z_t$  определяется формулой (13), а  $Y_t$  — решение уравнения (14).

**Утверждение 2.** Для  $h(s) = e^{-\alpha s}$  интегро-дифференциальную систему уравнений (13), (14) можно свести к системе дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{Y}_{t} = Q_{GB}(z_{t}) - Y_{t}, Y_{0} \in [0, 1], \\ \dot{z}_{t} = \frac{\alpha Y_{t} - e^{-\alpha t} z_{t}}{1 - e^{-\alpha t}} - \alpha z_{t}, z_{0} = 0. \end{cases}$$
(15)

Для тех же параметров функции (9) ( $\alpha_G > 1$ ,  $\beta_G > 1$  и  $\alpha_B < 1$ ,  $\beta_B < 1$ ), график которой изображен на рис. 5, для y(0) = Y(0) = 0,2 на рис. 6 изображены траектории решения уравнения (12) и системы (15) ( $\alpha = 0,5$ ).

Из рис. 6 видно, что траектория Y(t) решения системы (15) вначале растет быстрее «объективной» траектории (12), что объясняется малой долей, воспринимаемой на начальном этапе (линия z(t)). Но через некоторое время все процессы сходятся к одному и тому же значению. Это не имеет места, когда мы рассматриваем процесс «с запаздыванием».



**Утверждение 3.** Для  $h(s) = se^{-\alpha s}$  интегро-дифференциальную систему уравнений (13), (14) можно свести к системе дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{Y}_{t} = Q_{GB}(w_{t}) - Y_{t}, Y_{0} \in [0, 1], \\ \dot{z}_{t} = \frac{\alpha Y_{t} - e^{-\alpha t} z_{t}}{1 - e^{-\alpha t}} - \alpha z_{t}, z_{0} = 0, \\ \dot{w}_{t} = z_{t} \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} - \alpha w_{t} \frac{1 - e^{-\alpha t}}{1 - e^{-\alpha t}} - \alpha t e^{-\alpha t}, w_{0} = 0. \end{cases}$$
(16)

Траектории (верхние линии соответствуют w, а нижние — Y) и фазовые портреты системы (16) (для  $Y_t$ ,  $w_t$ ) изображены в табл. 4 для различных коэффициентов  $\alpha$ .

Пользуясь таблицей 4 для анализа процесса с запаздыванием, можно отметить следующие закономерности.

- Для значений коэффициента забывания α = 0,7 и α = 0,5 происходит циклический процесс, сходящийся к равновесию. Это видно и из траекторий, и из фазовых портретов. Но, в отличие от модели с забыванием, равновесие наступает для разных значений Y и w реальной и кажущейся долей действующих агентов.
- Для значения коэффициента забывания  $\alpha = 0,2,$  как видно из фазового портрета, циклический

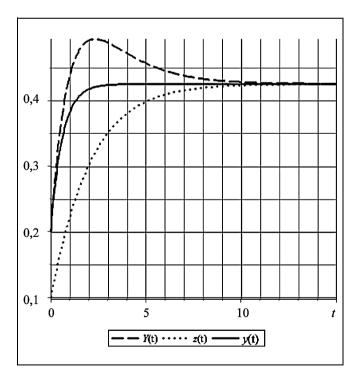


Рис. 6. Траектории моделей (12) и (15) при y(0) = Y(0) = 0,2

Траектории и фазовые портреты системы (16)

	Траектории системы (16)	Фазовый портрет системы (16)
$\alpha = 0.7$	Y, w 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0 5 10 15 t	0,8 0,6 0,4 0,2 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Y(t)
$\alpha = 0.5$	Y, w 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0 5 10 15 20 t	0,6 0,4 0,2 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Y(t)
$\alpha = 0.2$	V, w 0,8 0,6 0,4 0,2 0 5 10 15 20 t	0,8 0,6 0,4 0,2 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Y(t)

процесс не затухает и положение равновесия не лостигается.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе доказана эквивалентность модели ограниченного окружения Шеллинга и модели порогового поведения Грановеттера с некоторой функцией распределения. Введена классификация видов положений равновесия в зависимости от параметров соответствующей динамической системы.

Исследованы характерные свойства положений равновесия для системы с различными значениями параметров, которые содержательно интерпретируемы в рамках соответствующих моделей. Для моделей в дискретном и непрерывном времени эти свойства положений равновесия оказались различными. Показано, что модели внутренне конкурентного порогового поведения в дискретном и непрерывном времени отличаются друг от друга — в первой возможны циклы, а во второй при тех же значениях параметров циклов не наблюдается. Кроме того, в непрерывные модели можно добав-



лять функции забывания и запаздывания, что приводит к колебаниям в первые моменты времени, а также к различным значениям кажущихся и реальных долей действующих агентов.

Перспективными направления дальнейших исследований: изучение эквивалентности моделей типа Шеллинга и Грановеттера в теоретико-игровой форме, формальный переход между моделями в дискретном и непрерывном времени, а также исследования различных типов равновесий для рефлексивного поведения агентов. Кроме того, значительный интерес представляет апробация предложенных моделей толерантного порогового поведения на реальных социологических данных.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения 1. По определению (3)  $F_G(y^{(k)}) = \hat{F}_G\left(\frac{y^{(k)}}{1-y^{(k)}}\right)$ , поэтому из соотношения (2) следует

$$y^{(k+1)} = \frac{1 - \hat{F}_B \left(\frac{1 - y^{(k)}}{y^{(k)}}\right)}{R_{G/B}(1 - F_G(y^{(k)})) + 1 - \hat{F}_B \left(\frac{1 - y^{(k)}}{y^{(k)}}\right)}.$$
 (17)

Пусть  $\varphi: R \to R$  — функция такая, что

$$F_B(\varphi(y)) = \hat{F}_B\left(\frac{1-y}{y}\right). \tag{18}$$

По определению (3)  $F_B(\varphi(y)) = \hat{F}_B\left(\frac{\varphi(y)}{1-\varphi(y)}\right)$  , поэтому

из выражения (18) следует, что  $\frac{\varphi(y)}{1-\varphi(y)}=\frac{1-y}{y}$ . Решая последнее уравнение относительно  $\varphi$ , получим

$$\varphi(y) = 1 - y. \tag{19}$$

Рекуррентное соотношение (5) следует из выражений (17)—(19).

Докажем, что правая часть соотношения (5) есть некоторая функция распределения.

Из свойств функций распределения  $\hat{F}_G(\cdot)$  и  $\hat{F}_B(\cdot)$  следует, что  $F_{GB}(0+)=0$ ,  $F_{GB}(1-)=1$ . Из непрерывности  $\hat{F}_B(\cdot)$  и того, что  $\hat{F}_G(\cdot)$  является функцией распределения, следует, что  $F_{GB}(\cdot)$  непрерывна справа и имеет предел слева.

Осталось показать, что функция  $F_{GB}(\cdot)$  не убывает. Пусть  $y_1 < y_2$ , тогда необходимо доказать, что  $F_{GB}(y_2) = -F_{GB}(y_1) \ge 0$ . Так как знаменатель функции  $F_{GB}(\cdot)$  неот-

рицательное число для любого y, то остается доказать неравенство:

$$\begin{split} [1-F_B(1-y_2)][R_{G/B}(1-F_G(y_1)) + 1 - F_B(1-y_1)] - \\ - [1-F_B(1-y_1)][R_{G/B}(1-F_G(y_2)) + 1 - \\ - F_B(1-y_2)] \ge 0. \end{split} \tag{20}$$

Так как  $1 - F_G(y_1)$  — убывающая функция y, то, после замены  $y_1$  на  $y_2$  в этой функции для первого слагаемого неравенства (20), справедливо неравенство:

$$\begin{split} &[1-F_B(1-y_2)][R_{G/B}(1-F_G(y_1))+1-F_B(1-y_1)]-\\ &-[1-F_B(1-y_1)][R_{G/B}(1-F_G(y_2))+1-F_B(1-y_2)]\geq\\ &\geq [1-F_B(1-y_2)][R_{G/B}(1-F_G(y_2))+1-F_B(1-y_1)]-\\ &-[1-F_B(1-y_1)][R_{G/B}(1-F_G(y_2))+1-F_B(1-y_2)]=\\ &=R_{G/B}(1-F_G(y_2))[F_B(1-y_1)-F_B(1-y_2)]\geq 0 \end{split}$$

из которого следует неравенство (20).

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. Schelling T. Dynamic Models of Segregation // Journal of Mathematical Sociology. 1971. T. 1. C. 143—186.
- Granovetter M. Threshold Models of Collective Behavior // AJS. - 1978. - Vol. 83, N 6. - P. 1420-1443.
- 3. *Бреер В.В.* Модели конформного поведения. Ч. 1. От философии к математическим моделям // Проблемы управления. 2014. № 1. С. 2—13.
- 4. *Бреер В.В.* Модели конформного поведения. Ч. 2. Математические модели // Проблемы управления. 2014. № 2. С. 2—17.
- 5. *Словохотов Ю.Л.* Физика и социофизика // Проблемы управления. 2012. Ч. 1. № 1. С. 2—20; Ч. 2. № 2. С. 2—31; Ч. 3. № 3. С. 2—34.
- 6. *Hatna E., Benenson I.* The Schelling Model of Ethnic Residential Dynamics: Beyond the Integrated Segregated Dichotomy of Patterns // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2012. Vol. 15, iss. 1. URL: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/1/6.html (дата обращения: 26.11.2015).
- 7. Dokumaci E. Sandholm W. Schelling Redux: An Evolutionary Dynamic Model of Residential Segregation. University of Wiscontine, June, 2007. P. 1—37. URL: http://www.ssc.wisc.edu/~whs/research/schelling.pdf (дата обращения: 26.11.2015).
- 8. *Li Z., Tang X.* A Study of Collective Action Threshold Model Based on Utility and Psychological Theories // Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7669. P. 474—482.
- 9. *Kimmel M.S.* Revolution, a Sociological Interpretation Philadelphia: Temple University Press, 1990. 252 p.
- Бреер В.В. Теоретико-игровые модели конформного поведения // Автоматика и телемеханика. — 2012. — № 10. — С. 111—126.
- Кузнецов О.П. Сложные сети и распространение активности // Автоматика и телемеханика. 2015. № 12. С. 3—26.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.



УДК 519.8

## КОНСЕНСУС В СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ С ДВУМЯ ЦЕНТРАМИ ВЛИЯНИЯ<sup>1</sup>

В.М. Буре, Е.М. Парилина, А.А. Седаков

Рассмотрена модель динамики мнений в социальной сети, среди участников которой выделены два центра влияния (участники сети могут влиять на мнения друг друга, а динамика мнений участников сети описывается однородной цепью Маркова). Изучен вопрос о существовании консенсуса в сети для двух моделей влияния: когда центры могут напрямую влиять на мнения друг друга и когда не могут. Найдены значения параметров социальной сети, при которых достигается консенсус. Для случаев, когда консенсус не достигается, введено понятие консенсуса большинства, и найдены значения параметров, при которых он достигается. Теоретические результаты проиллюстрированы на численных примерах.

Ключевые слова: модель Де Гроота, влияние, консенсус, динамика мнений.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Математическая модель динамики мнений участников социальной сети, использующая теорию марковских процессов, была предложена Де Гроотом [1]. В его модели предполагается, что на мнения любого участника могут влиять остальные участники с заданными весами, которые не меняются во времени. Мнение участника о некоторой неизвестной величине в следующий момент времени представляет собой линейную комбинацию всех мнений участников социальной сети в текущий момент. Де Гроот ввел понятие консенсуса и определил достаточные условия его достижения. В работе [2] модель Де Гроота расширяется понятием «мудрого» общества, также изучается вопрос достижения «правды» в случае, когда число участников неограниченно растет. В качестве примера рассматривается сеть, в которой один участник является «центром», а все остальные участники сети симметричны. В этом случае матрица влияния участников друг на друга, задающая динамику мнений, имеет специальный вид. Доказано, что существует матрица предельного влияния, а также получены ее компоненты в явном виде. В работе [3] приводится альтернативная модель формирования мнений, в которой основное предположение заключается в том, что участники сети могут не наблюдать истинных мнений других участников, а наблюдают лишь только те мнения, которые они заявляют. В этой модели считается известным только свое собственное истинное мнение в каждый момент времени. В работе [4] сформулирована модель формирования профиля мнений внутри некоторой социальной группы, например, среди сотрудников некоторой компании по отношению к предложенной руководителем компании инициативе. Модель характеризует взаимное влияние сотрудников друг на друга, а также взаимное влияние руководителя на сотрудников и наоборот. В качестве центра влияния рассматривается руководитель компании.

В работах [5, 6] рассматривается управляемая модель Де Гроота — теоретико-игровая модель информационного противоборства, динамика мнений в которой также задается однородной цепью Маркова. Предполагается, что «центр» может управлять мнением участников сети, т. е. его управление входит в уравнение динамики мнений. Теоретико-игровой подход для моделирования динамики мнений применен также в работе [7]. С целью изучения вопроса сходимости мнений авторы предлагают обратиться к графам для описания структуры взаимодействия участников сети и предполагают, что их мнения меняются, агрегируя мнения всех участников сети. Далее авторами изучается вопрос сходимости мнений. Иерархические структуры взаимодействия участников сети рассматриваются также в работе [8], где среди всех

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (14-01-31141\_мол\_а) и Санкт-Петербургского государственного университета (9.38.245.2014).



участников выделяется один центр (главный игрок) на первом уровне, а на втором уровне — остальные симметричные игроки. Для заданной иерархической структуры находятся устойчивые разбиения множества участников.

В настоящей работе изучается социальная сеть, которая содержит два центра, каждый из которых может влиять на всех остальных участников сети. Случай существования двух центров позволяет описывать динамику мнений в социальной сети при наличии как «основной», так и «альтернативной» точках зрения о некоторой величине или событии.

Мы предполагаем, что участники сети, не являющиеся центрами, не влияют друг на друга. Такое допущение, в некоторой степени, ограничивает область применения представленной модели, однако существуют примеры сетей такого типа. В качестве одного из них можно рассмотреть некоторую территорию с удаленными друг от друга населенными пунктами с несколькими центрами влияния. «Обычного» участника сети можно рассмотреть как агрегированного жителя, мнение которого выражает мнение всех жителей этого населенного пункта. Ввиду удаленности населенных пунктов прямое общение их жителей затруднительно, и оно возможно лишь через центры влияния. Другим примером сети может быть трудовой коллектив, часть работников которого не имеет возможности напрямую обмениваться мнениями согласно протоколу трудовых отношений. Такой протокол может содержать запрет на обмен информацией, в том числе и сведений, предоставляемых руководителем (или центром). Руководитель, например, может собирать мнение о каком-либо работнике коллектива, конфиденциально обмениваясь своим мнением с каждым «обычным» участником коллектива.

Исследуются два случая: когда центры непосредственно влияют друг на друга и когда такого влияния нет. Для каждого случая в зависимости от значений параметров модели получены условия существования предельной матрицы влияния, однако оказывается, что консенсус достигается не во всех случаях.

Мы вводим понятие консенсуса большинства, понимая под «большинством» всех участников социальной сети, не являющихся центрами. Необходимость в таком понятии обусловлена тем, что может ставиться не задача достижения согласованности мнений среди всех участников, а задача нахождения условий согласованности мнений лишь большинства. Считается, что консенсус большинства достигается, если для любого начального мнения всех участников предельное мнение участников, кроме центров, совпадает. В работе

найдены значения параметров моделей, при которых консенсус не достигается, но достигается консенсус большинства. Дополнительно проведен анализ компонент предельного распределения влияний в случае, когда достигается консенсус, как функций параметров моделей. Также была решена задача нахождения интервала, в котором должно находиться суммарное влияние всех участников сети на центр, чтобы предельное влияние этого центра находилось в заданном промежутке.

Для изучения вопроса существования консенсуса в работе применяется метод исследования степеней матрицы влияния, широко распространенный в теории цепей Маркова и используемый Де Гроотом [1]. Эту задачу можно решать с помощью другого подхода [9]. В нашей работе изучается вопрос достижения консенсуса в социальных сетях определенной структуры с двумя центрами влияния. Влияние агентов сети определяется матрицей, по которой можно сделать выводы о наличии или отсутствии консенсуса или консенсуса большинства. Интересным также представляется вопрос нахождения случаев, когда консенсус не достигается, но достигается консенсус большинства.

Последующее изучение предельных влияний участников сети как функций ее параметров позволяет понять, как необходимо изменить ее параметры, чтобы добиться заданного уровня предельного влияния того или иного участника.

Статья имеет следующую структуру. В § 1 приводится математическая модель на основе модели Де Гроота. В § 2 изучается модель с двумя независимыми центрами, которые не имеют прямого влияния друг на друга. Найдена матрица предельных влияний, отдельно рассмотрены граничные значения параметров, проведен анализ на чувствительность, а также получена интервальная оценка для суммарного влияния участников сети на центр. Модель с зависимыми центрами влияния представлена в § 3. Так же, как и в § 2, проведен аналогичный анализ. Численные примеры, иллюстрирующие теоретические результаты, завершают § 2 и § 3.

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим конечную группу участников  $N = \{1, ..., n\}, n > 2$ , каждый из которых имеет свое субъективное мнение о некоторой «инициативе». Предположим, что мнение участника  $i \in N$  об инициативе в момент времени k = 0, 1, ... может быть выражено величиной  $p_i(k)$  из промежутка [0, 1], которое в следующий момент времени формируется с учетом как  $p_i(k)$ , так и мнений  $p_j(k)$  других участников  $j \neq i$ . Пусть T — квадратная матрица



размерности n, каждый элемент которой указывает степень влияния участника j на участника i (или степень доверия участника i участнику j), выраженную вещественным числом  $t_{ij} \in [0, 1]$ . Такую матрицу назовем матрицей влияния. Матрица T не обязательно симметричная  $(t_{ij} \neq t_{ij}$  для некоторых i,j) и допускает одностороннее влияние одного участника из группы на другого  $(t_{ij} > 0, t_{ji} = 0)$ , однако рассматриваемая матрица должна быть

стохастической, т. е.  $\sum_{j=1}^n t_{ij} = 1$  для любого  $i \in N$ .

Дополнительно предполагается, что степень влияния одного участника на другого не меняется с течением времени.

Вектор мнений всех участников в момент времени k обозначим через  $p(k) = (p_1(k), ..., p_n(k))^T$ , где p(0) — заданный вектор начальных мнений. Уточненное мнение участника в следующий момент времени определяется согласно правилу:

$$p_i(k+1) = \sum_{j=1}^{n} t_{ij} p_j(k)$$

или в матричной форме

$$p(k+1) = Tp(k). (1)$$

Принимая во внимание вектор начальных мнений, систему (1) можно переписать в виде:

$$p(k) = T^k p(0). (2)$$

Мы считаем, что участники уточняют свои мнения либо в течение бесконечно долгого периода времени, либо же пока для некоторого k не будет выполняться p(k + 1) = p(k), что означает остановку уточнения мнений участников. В этой связи возникает естественный вопрос о сходимости процесса (2). Рассматриваемый процесс сходится, если  $\lim_{k \to \infty} p_i(k) = \bar{p}$  для каждого участника  $i \in N$ . В этом случае сходимость процесса означает, что мнения всех участников сходятся к одному мнению  $\bar{p}$ . В работе [1] было введено понятия «консенсуса»: говорят, что достигается консенсус, если существует такое предельное мнение  $\bar{p}$  для каждого участника  $i \in N$ . Будем говорить, что консенсус достигается, если существует такой вектор  $s = (s_1, ..., s_n)$ , что  $\lim_{k \to \infty} (T^k)_{ij} = s_j$  для всех  $i,\,j=1,\;...,\;n,\;$ где  $(T^k)_{ij}$  есть элемент  $(i,\,j)$  матрицы  $T^k$ . Когда достигается консенсус, итоговое мнение каждого участника будет  $sp(0) = \sum_{i=1}^{n} s_{j} p_{j}(0),$ а поскольку сходимость матрицы  $T^k$  при  $k \to \infty$ 

не зависит от вектора начальных мнений p(0), то все  $s_j$ , j=1,...,n, также не зависят от p(0). Компоненту  $s_j$  вектора s будем называть предельным влиянием участника j.

Даже если предельная матрица  $\overline{T}=\lim_{k\to\infty}T^k$  существует, ее строки могут не совпадать. Это означает, что консенсус не достигается. Однако может возникнуть вопрос о достижимости «согласованного» мнения среди некоторого подмножества группы участников. Обозначим через A такое подмножество. Будем говорить, что достигается консенсус в A, если существует такая предельная матрица  $\overline{T}$ , что  $(\overline{T})_{ij}=s_j^A$  для всех  $i\in A, j=1,...,n$ . Когда достигается консенсус в A, итоговое мнение каждого участника из A определяется как  $s^Ap(0)=\sum_{j=1}^n s_j^A p_j(0)$ , где  $s^A=(s_1^A,...,s_n^A)$ . Компоненту  $s_j^A$  вектора  $s^A$  будем называть предельным влиянием участника j в группе A.

**Утверждение 1** [1, 10]. Если существует положительное число  $k_0$ , для которого все элементы, по крайней мере, одного столбца матрицы  $\overline{T}^{k_0}$  положительны, тогда существует предельная матрица  $\overline{T} = \lim_{k \to \infty} T^k$ .

**Утверждение 2** [11]. Если существует положительное число  $k_0$ , для которого все элементы матрицы  $T^{k_0}$  положительны, тогда существует такая предельная матрица  $\overline{T} = \lim_{k \to \infty} T^k$ , что  $\lim_{k \to \infty} (T^k)_{ij} = s_j$  для всех i, j = 1, ..., n, и при этом  $\sum_{j=1}^n s_j = 1$ .

Консенсус можно найти в явном виде. Неотрицательный вектор s называется вектором стационарного распределения вероятностей, если он является решением уравнения s=sT и при этом  $\sum_{j=1}^n s_j = 1.$ 

**Утверждение 3** [1]. Предположим, что консенсус достигается, и величина sp(0) есть итоговое мнение при консенсусе. Тогда вектор s — единственный вектор стационарного распределения вероятностей.

#### 2. КОНСЕНСУС В СЕТИ С ДВУМЯ ЦЕНТРАМИ, НЕ ВЛИЯЮЩИМИ ДРУГ НА ДРУГА НАПРЯМУЮ

#### 2.1. Предельное влияние участников. Достижимость консенсуса

Предположим, что множество N содержит два центра (участники 1 и 2), не влияющие напрямую



друга на друга. Назовем множество участников  $\{3, ..., n\}$  большинством и обозначим его через A. Пусть  $\delta \in (0, 1)$  представляет собой суммарное влияние участников из A на участника  $1, \sigma \in (0, 1)$ представляет собой суммарное влияние участников из A на участника 2. Отметим, что в рассматриваемой постановке ни один из центров не влияет на другой. Величина 1 - ε представляет собой суммарное влияние центров на любого участника из A, которое распределяется между центрами в соотношении  $\lambda$  и  $1 - \lambda$  для  $\lambda \in (0, 1)$ ,  $\epsilon \in [0, 1)$ . Дополнительно будем считать, что на мнение любого участника, не являющегося центром, не могут влиять другие участники сети из  $N \setminus \{1, 2\}$ . В рамках сделанных предположений матрица влияния имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} 1 - \delta & 0 & \frac{\delta}{n-2} \dots \frac{\delta}{n-2} \\ 0 & 1 - \sigma & \frac{\sigma}{n-2} \dots \frac{\sigma}{n-2} \\ \lambda(1-\varepsilon) & (1-\lambda)(1-\varepsilon) & \varepsilon & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(1-\varepsilon) & (1-\lambda)(1-\varepsilon) & 0 & \dots & \varepsilon \end{pmatrix}.$$

Будем говорить, что достигается «консенсус большинства», если достигается консенсус в группе A.

**Утверждение 4.** При заданной матрице влияния Т консенсус достигается, и предельное влияние участника ј имеет вид:

$$s_{j} = \begin{cases} \frac{\lambda(1-\varepsilon)\sigma}{(1-\varepsilon)[\lambda\sigma + (1-\lambda)\delta] + \sigma\delta}, & j = 1, \\ \frac{(1-\lambda)(1-\varepsilon)\delta}{(1-\varepsilon)[\lambda\sigma + (1-\lambda)\delta] + \sigma\delta}, & j = 2, \\ \frac{\sigma\delta}{(n-2)[(1-\varepsilon)[\lambda\sigma + (1-\lambda)\delta] + \sigma\delta]}, & j = 3, ..., n. \end{cases}$$
(3)

Доказательство. Для доказательства существования предельной матрицы влияния  $\overline{T}$  вычислим матрицу  $T^2$ :

Из вида матрицы  $T^2$  заключаем, что все ее столбцы содержат только положительные элементы. Следовательно, согласно утверждениям 1 и 2, существует предельная матрица  $\overline{T}$ , строки которой одинаковы. Нетрудно показать, что вектор предельных влияний участников s (совпадающий с любой строкой матрицы  $\overline{T}$ ), компоненты которого определяются формулой (3), удовлетворяет системе s=sT, и сумма всех его координат равна единице.

#### 2.2. Анализ предельных влияний на чувствительность

Проведем анализ компонент вектора s, определяемых формулой (3). Отметим, что компоненты  $s_1$  и  $s_2$  не зависят от общего числа участников.

**Утверждение 5.** Компоненты вектора предельных влияний  $s = (s_1, ..., s_n)$  обладают следующими свойствами:

 $s_1$  — убывающая функция по  $\delta$  и  $\epsilon$  и возрастающая функция по  $\sigma$  и  $\lambda$ ;

 $s_2$  — возрастающая функция по  $\delta$  и убывающая функция по  $\sigma$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$ ;

 $s_j, j=3, ..., n-$  убывающая функция по n и возрастающая функция по  $\delta$ ,  $\sigma$  и  $\varepsilon$ . При  $\delta > \sigma$  предельное влияние участника j — возрастающая функция по  $\lambda$ , а при  $\delta < \sigma$  — убывающая по  $\lambda$ .  $\blacklozenge$ 

Утверждение 5 следует из вида предельных влияний (3) как функций параметров  $\delta$ ,  $\sigma$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$ .

Приведенные в утверждении 5 свойства имеют следующую интерпретацию. С ростом суммарного влияния участников  $j \in A$  на первый центр уменьшается предельное влияние  $s_1$  и увеличивается предельное влияние  $s_2$ . Чем меньше каждый из участников  $j \in A$  влияет на центр, тем больше предельное влияние этого центра. С ростом суммарного влияния участников A на второй центр возрастает предельное влияние  $s_1$  и уменьшается предельное влияние  $s_2$ . С ростом влияния первого центра на любого участника из A возрастает его предельное влияние, а с ростом влияния первого центра на любого участника из A уменьшается предельное влияние второго центра.

$$\begin{pmatrix} (1-\delta)^2 + \lambda(1-\varepsilon)\delta & (1-\lambda)(1-\varepsilon)\delta & \frac{\delta(1-\delta+\varepsilon)}{n-2} & \dots & \frac{\delta(1-\delta+\varepsilon)}{n-2} \\ \lambda(1-\varepsilon)\sigma & (1-\sigma)^2 + (1-\lambda)(1-\varepsilon)\sigma & \frac{\sigma(1-\sigma+\varepsilon)}{n-2} & \dots & \frac{\sigma(1-\sigma+\varepsilon)}{n-2} \\ \lambda(1-\varepsilon)(1-\delta+\varepsilon) & (1-\lambda)(1-\varepsilon)(1-\sigma+\varepsilon) & \frac{(1-\varepsilon)[\lambda\delta+(1-\lambda)\sigma]}{n-2} + \varepsilon^2 & \dots & \frac{(1-\varepsilon)[\lambda\delta+(1-\lambda)\sigma]}{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(1-\varepsilon)(1-\delta+\varepsilon) & (1-\lambda)(1-\varepsilon)(1-\sigma+\varepsilon) & \frac{(1-\varepsilon)[\lambda\delta+(1-\lambda)\sigma]}{n-2} & \dots & \frac{(1-\varepsilon)[\lambda\delta+(1-\lambda)\sigma]}{n-2} + \varepsilon^2 \end{pmatrix}$$



Чем больше участников в группе, тем меньше предельное влияние участника, не являющегося центром. С увеличением суммарного влияния участников из A на первый или второй центр увеличивается предельное влияние  $s_j, j \in A$ . Чем меньше каждый из участников  $j \in A$  влияет на центры, тем больше его предельное влияние. Если суммарное влияние участников из A на первый центр больше, чем на второй, то с увеличением влияния первого центра на участников из A увеличивается предельное влияние участника из A. Если суммарное влияние участников из A на первый центр меньше, чем на второй, то с увеличением влияния первого центра на участников из A уменьшается предельное влияние участников из A уменьшается предельное влияние участника из A.

#### 2.3. Анализ дополнительных значений параметров социальной сети

Проведем анализ социальной сети при дополнительных значениях ее параметров, не исследованных ранее.

**Утверждение 6.** Если  $\varepsilon = 1$  и  $\delta$ ,  $\sigma \in [0, 1]$ , то существует предельная матрица  $\overline{T} = \lim_{k \to \infty} T^k$ . В этом случае ни консенсус, ни консенсус большинства не достигаются.

 $\mathcal{A}$  оказательство. Существование предельной матрицы  $\overline{T}$  следует из вида матрицы  $T^k$ :

$$T^{k} = \begin{pmatrix} (1-\delta)^{k} & 0 & \frac{1-(1-\delta)^{k}}{n-2} \dots \frac{1-(1-\delta)^{k}}{n-2} \\ 0 & (1-\sigma)^{k} \frac{1-(1-\sigma)^{k}}{n-2} \dots \frac{1-(1-\sigma)^{k}}{n-2} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

а сам вид  $\overline{T}$  зависит от значений  $\delta$  и  $\sigma$ . Поскольку все строки с номерами  $\{3,...,n\}$  различны, то ни консенсус, ни консенсус большинства не достигаются.

**Утверждение 7.** Если  $\varepsilon = 0$  и  $\delta = \sigma = 1$ , то предельной матрицы  $\overline{T}$  не существует. В этом случае ни консенсус, ни консенсус большинства не достигаются.

 $\mathcal{A}$ оказательство. Заметим, что нечетная степень матрицы Tимеет вид

$$T^{2l+1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{n-2} & \dots & \frac{1}{n-2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{n-2} & \dots & \frac{1}{n-2} \\ \lambda & 1-\lambda & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda & 1-\lambda & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad l = 0, 1, \dots,$$

а ее четная степень имеет вид

$$T^{2l} = \begin{pmatrix} \lambda & 1 - \lambda & 0 & \dots & 0 \\ \lambda & 1 - \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n-2} & \dots & \frac{1}{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{1}{n-2} & \dots & \frac{1}{n-2} \end{pmatrix}, \quad l = 1, 2, \dots$$

Следовательно, не существует предельной матрицы  $\overline{T}$ , а это, в свою очередь, влечет недостижимость ни консенсуса, ни консенсуса большинства.

**Утверждение 8.** Если  $\delta = \sigma = 0$ , то консенсус не достигается, но достигается консенсус большинства. Предельная матрица влияний существует, она зависит только от  $\lambda$  и имеет вид:

$$\overline{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda & 1 - \lambda & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda & 1 - \lambda & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Доказательство. При  $\delta = \sigma = 0$  матрица влияния T имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda(1-\varepsilon) & (1-\lambda)(1-\varepsilon) & \varepsilon & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(1-\varepsilon) & (1-\lambda)(1-\varepsilon) & 0 & \dots & \varepsilon \end{pmatrix}.$$

Сначала покажем, что k-я степень матрицы T имеет вид:

$$T^{k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda(1-\varepsilon)\sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon^{i} & (1-\lambda)(1-\varepsilon)\sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon^{i} & \varepsilon^{k} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(1-\varepsilon)\sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon^{i} & (1-\lambda)(1-\varepsilon)\sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon^{i} & 0 & \dots & \varepsilon^{k} \end{pmatrix}.$$

Доказательство проведем по индукции с базой k=1. Найдем элементы  $(T^{k+1})_{i1}$  и  $(T^{k+1})_{i2}$  для i=3,...,n матрицы  $T^{k+1}$ :

$$(T^{k+1})_{i1} = \lambda(1-\varepsilon) \left[ 1 + \varepsilon \sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon^{i} \right] = \lambda(1-\varepsilon) \sum_{i=0}^{k} \varepsilon^{i},$$

$$(T^{k+1})_{i2} = (1-\lambda)(1-\varepsilon) \left[ 1 + \varepsilon \sum_{i=0}^{k-1} \varepsilon^{i} \right] =$$

$$= (1-\lambda)(1-\varepsilon) \sum_{i=0}^{k} \varepsilon^{i}.$$



Остальные элементы матрицы  $T^{k+1}$  найти не представляет сложности. Поскольку  $\varepsilon < 1$ , то существует предельная матрица  $\lim_{k \to \infty} T^k$ , которая совпадает с матрицей (4).  $\bullet$ 

Легко показать, что в случае, когда  $\delta = \sigma = 1$  и  $\epsilon \in (0, 1)$ , консенсус достигается, и предельное влияние участников сети можно найти по формуле (3). При равенстве нулю параметра  $\sigma$  предельная матрица существует, но вторая строка в матрице предельных влияний — (0, 1, 0, ..., 0), а строки  $\{3, ..., n\}$  совпадают. Это позволяет утверждать, что консенсус не достигается, но консенсус большинства достигается. Аналогично, если  $\delta = 0$ , то предельная матрица существует, но первая строка в матрице предельных влияний — (1, 0, 0, ..., 0), а строки  $\{3, ..., n\}$  совпадают. Это также позволяет утверждать, что консенсус не достигается, но консенсус большинства достижим.

#### 2.4. Интервальная оценка предельного влияния

Пусть значения  $\sigma$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  зафиксированы. Выясним, в каком промежутке должно находиться  $\delta$  (суммарное влияние участников  $\{3, ..., n\}$  на участника 1), чтобы его предельное влияние  $s_1$ , определяемое выражением (3), находилось в заданном промежутке  $[\theta_1, \theta_2]$ . Нетрудно убедиться, что для этого достаточно, чтобы

$$\begin{split} &\frac{\lambda(1-\epsilon)\sigma}{(1-\lambda)(1-\epsilon)+\sigma}\left[\frac{1}{\theta_2}-1\right] \leq \delta \leq \\ &\leq \frac{\lambda(1-\epsilon)\sigma}{(1-\lambda)(1-\epsilon)+\sigma}\left[\frac{1}{\theta_1}-1\right]. \end{split}$$

Аналогичным образом, для фиксированных значений  $\delta$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  можно найти промежуток для  $\sigma$  (суммарное влияние участников  $\{3, ..., n\}$  на участника 2), чтобы его предельное влияние  $s_2$ , определяемое выражением (3), находилось в заданном промежутке  $[\theta_1, \theta_2]$ . Для этого достаточно, чтобы

$$\frac{(1-\lambda)(1-\epsilon)\delta}{\lambda(1-\epsilon)+\delta} \left[ \frac{1}{\theta_2} - 1 \right] \le \sigma \le 
\le \frac{(1-\lambda)(1-\epsilon)\delta}{\lambda(1-\epsilon)+\delta} \left[ \frac{1}{\theta_1} - 1 \right].$$
(5)

**Пример 1.** Рассмотрим группу из n=10 участников, начальные мнения которых p(0)=(1;0;0,9;0,9;0,75;0,75;0,75;0,5;0,25;0,1). Параметры модели:  $\delta=0,3;\sigma=0,2;\epsilon=0,05;\lambda=0,75$ . Используя формулы (3), получим вектор предельных влияний s=(0,5205;0,2603;0,0274;0,0

Определим, например, каким должно быть значение  $\sigma$ , чтобы для фиксированных значений  $\delta$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  предельное влияние s, находилось в промежутке [0,5;0,99]. Под-

ставляя значения  $\theta_1=0.5,\ \theta_1=0.99$  в формулу (5), получим  $0.0007 \le \sigma \le 0.0704$ .

## 3. КОНСЕНСУС В СЕТИ С ДВУМЯ ЦЕНТРАМИ, ВЛИЯЮЩИМИ ДРУГ НА ДРУГА НАПРЯМУЮ

#### 3.1. Предельное влияние участников. Достижимость консенсуса

Рассмотрим предыдущую модель в предположении, что первый и второй центры теперь могут влиять на мнения друг друга. Пусть величины  $\delta_1$ ,  $\sigma_1 \in (0, 1)$  показывают степень влияния участников из A на первый и второй центры, величина  $\delta_2 \in (0, 1)$  показывает степень влияния второго центра на первый, а величина  $\sigma_2 \in (0, 1)$  показывает степень влияния первого центра на второй. Дополнительно накладываются ограничения  $\delta_1 + \delta_2 < 1$  и  $\sigma_1 + \sigma_2 < 1$ . Величины  $\epsilon$ ,  $\lambda$  имеют ту же интерпретацию. Здесь так же, как и в § 2, мы считаем, что на мнение любого участника из A не могут влиять другие участники сети из этого множества. Матрица влияния в этом случае принимает вид:

$$T = \begin{pmatrix} 1 - \delta_1 - \delta_2 & \delta_2 & \frac{\delta_1}{n-2} \dots \frac{\delta_1}{n-2} \\ \sigma_2 & 1 - \sigma_1 - \sigma_2 & \frac{\sigma_1}{n-2} \dots \frac{\sigma_1}{n-2} \\ \lambda(1 - \varepsilon) & (1 - \lambda)(1 - \varepsilon) & \varepsilon & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(1 - \varepsilon) & (1 - \lambda)(1 - \varepsilon) & 0 & \dots & \varepsilon \end{pmatrix}$$

**Утверждение 9.** При заданной матрице влияния Т консенсус достигается, и предельное влияние участника ј имеет вид:

$$s_{j} = \begin{cases} \frac{(1-\varepsilon)\times}{(1-\varepsilon)[\lambda\sigma_{1}+(1-\lambda)\delta_{1}+\sigma_{2}+\delta_{2}]+} \to \\ \frac{\times(\lambda\sigma_{1}+\sigma_{2})}{+(\delta_{1}+\delta_{2})(\sigma_{1}+\sigma_{2})-\sigma_{2}\delta_{2}}, & j=1, \\ \frac{(1-\varepsilon)\times}{(1-\varepsilon)[\lambda\sigma_{1}+(1-\lambda)\delta_{1}+\sigma_{2}+\delta_{2}]+} \to \\ \frac{\times[(1-\lambda)\delta_{1}+\delta_{2}]}{+(\delta_{1}+\delta_{2})(\sigma_{1}+\sigma_{2})-\sigma_{2}\delta_{2}}, & j=2, \\ \frac{(\delta_{1}+\delta_{2})(\sigma_{1}+\sigma_{2})-}{(n-2)[(1-\varepsilon)[\lambda\sigma_{1}+(1-\lambda)\delta_{1}+\sigma_{2}+\delta_{2}]+} \to \\ \frac{-\sigma_{2}\delta_{2}}{+(\delta_{1}+\delta_{2})(\sigma_{1}+\sigma_{2})-\sigma_{2}\delta_{2}}, & j=3,...,n. \end{cases}$$

$$(6)$$



Доказательство. Для доказательства существования предельной матрицы влияния  $\overline{T}$  достаточно заметить, что матрица  $T^2$  содержит только положительные элементы (ее вид мы не приводим из-за громоздкости). Следовательно, согласно утверждениям 1 и 2 существует предельная матрица  $\overline{T}$ , строки которой одинаковы. Нетрудно показать, что вектор предельных влияний участников s (совпадающий с любой строкой матрицы  $\overline{T}$ ), компоненты которого определяются формулой (6), удовлетворяет системе s=sT, и сумма всех его координат равна единице.  $\bullet$ 

Рассматриваемая модель обобщает предыдущую: при подстановке значений  $\delta_2 = \sigma_2 = 0$  предельные влияния (3) и (6) совпадают. Кроме этого, выражения для  $s_1$  и  $s_2$  также не зависят от общего числа участников.

#### 3.2 Анализ предельных влияний на чувствительность

Проведем анализ компонент вектора s, определяемых формулой (6).

**Утверждение 10.** Компоненты вектора предельных влияний  $s = (s_1, ..., s_n)$  обладают следующими свойствами:

- $s_1$  убывающая функция по  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\epsilon$  и возрастающая функция по  $\sigma_2$  и  $\lambda$ ;  $s_1$  возрастающая функция по  $\sigma_1$ , если  $\sigma_2 < \lambda(1-\epsilon)$  и убывающая функция по  $\sigma_1$ , если  $\sigma_2 > \lambda(1-\epsilon)$ ;
- $s_2$  убывающая функция по  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\varepsilon$  и  $\lambda$  и возрастающая функция по  $\delta_2$ ;  $s_2$  возрастающая функция по  $\delta_1$ , если  $\delta_2 < (1-\lambda)(1-\varepsilon)$ , и убывающая функция по  $\delta_1$ , если  $\delta_2 > (1-\lambda)(1-\varepsilon)$ ;
- $s_j$  убывающая функция по n и возрастающая функция по  $\delta_1$ ,  $\sigma_1$  и  $\varepsilon$  для всех  $j \in A$ ;  $s_j$  возрастающая функция по  $\delta_2$  и убывающая по  $\sigma_2$  и  $\delta_3$  и возрастающая по  $\delta_4$  и возрастающая по  $\delta_5$  и  $\delta_6$  и возрастающая по  $\delta_6$  и  $\delta_7$  и  $\delta_8$  и возрастающая по  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и возрастающая по  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и возрастающая по  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и  $\delta_8$  если  $\delta_8$  об  $\delta_8$  и возрастающая по  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и возрастающая по  $\delta_8$  и  $\delta_8$  и возраста

Утверждение 10 следует из вида выражений предельных влияний (6) как функций параметров  $\delta_1,\ \delta_2,\ \sigma_1,\ \sigma_2,\ \epsilon,\ \lambda.$ 

Приведенные в утверждении 10 свойства имеют следующую интерпретацию. При увеличении влияния второго центра на первый уменьшается предельное влияние  $s_1$  и увеличивается предельное влияние  $s_2$ . При увеличении суммарного влияния участников из A на первый центр уменьшается предельное влияние  $s_1$ . При увеличении суммарного влияния участников из A на второй центр уменьшается предельное влияние  $s_2$ . При увеличении влияния первого центра на второй увеличивается предельное влияние  $s_1$  и уменьшается

предельное влияние  $s_2$ . При уменьшении влияния центров на участников из  $\emph{A}$  уменьшаются предельные влияния центров  $s_1$  и  $s_2$ . Если влияние первого центра на второй больше, чем влияние на участника из A, то предельное влияние  $s_1$  уменьшается с ростом суммарного влияния участников из A на второй центр. Если же влияние первого центра на второй меньше, чем влияние на участника из A, то предельное влияние  $s_1$  возрастает с ростом суммарного влияния участников из A на второй центр. Если влияние второго центра на первый меньше, чем на любого участника из A, то предельное влияние s<sub>2</sub> возрастает с ростом суммарного влияния участников из  $\emph{A}$  на первый центр. Если же влияние второго центра на первый больше, чем на любого участника из A, то предельное влияние  $s_2$  убывает с ростом суммарного влияния участников из A на первый центр.

Рассмотрим поведение компоненты  $s_j, j \in A$ , при изменении параметров модели. Предельное влияние  $s_i$  уменьшается с ростом общего числа участников сети. При увеличении суммарного влияния участников из A как на первый, так и на второй центр предельное влияние  $s_i$  увеличивается. При уменьшении влияния центров на участников из Aувеличивается предельное влияние  $s_i$ . В случае, когда влияние участника из  $\emph{A}$  на второй центр больше, чем на первый, предельное влияние  $s_i$  возрастает с ростом влияния второго центра на первый и убывает с ростом влияния первого на второй. В случае, когда влияние участника из  $\it A$  на второй центр меньше, чем на первый, предельное влияние  $s_i$  убывает с ростом влияния второго центра на первый и возрастает с ростом влияния первого на второй.

Стоит отметить появление нового эффекта при рассмотрении возможностей влияния одного центра на другой: поведение предельного влияния центра теперь зависит от соотношения между уровнями влияния альтернативного центра и участника из A на этот центр. Дополнительно, поведение предельного влияния участника из A теперь зависит от соотношения между уровнями влияния центров на этого участника.

#### 3.3. Интервальная оценка предельного влияния

Пусть значения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  зафиксированы. Выясним, в какой области должны находиться  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (влияния участников 2, ..., n на участника 1), чтобы его предельное влияние  $s_1$ , определяемое выражением (6), находилось в заданном проме-



жутке  $[\theta_1, \ \theta_2]$ . Нетрудно убедиться, что для этого достаточно, чтобы

$$\begin{aligned} &(1-\varepsilon)(\lambda\sigma_1+\sigma_2)[1/\theta_2-1] \leq \zeta_1\delta_1 + \\ &+\zeta_2\delta_2 \leq &(1-\varepsilon)(\lambda\sigma_1+\sigma_2)[1/\theta_1-1], \end{aligned} \tag{7}$$

где 
$$\zeta_1 = (1 - \lambda)(1 - \varepsilon) + \sigma_1 + \sigma_2$$
,  $\zeta_2 = 1 - \varepsilon + \sigma_1$ .

Аналогичным образом для фиксированных значений  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  можно найти область для  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  (влияния участников 1, 3, ..., n на участника 2), чтобы его предельное влияние  $s_2$ , определяемое выражением (6), находилось в заданном промежутке  $[\theta_1, \theta_2]$ . Для этого достаточно, чтобы

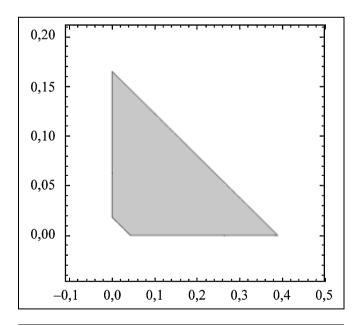
$$(1 - \varepsilon)[(1 - \lambda)\delta_1 + \delta_2)[1/\theta_2 - 1] \le \zeta_1'\sigma_1 + + \zeta_2'\sigma_2 \le (1 - \varepsilon)[(1 - \lambda)\delta_1 + \delta_2][1/\theta_1 - 1],$$

где 
$$\zeta_1' = \lambda(1-\epsilon) + \delta_1 + \delta_2$$
,  $\zeta_2' = 1 - \epsilon + \delta_1$ .

**Пример 2.** Рассмотрим группу из 10 участников, начальные мнения которых p(0)=(1;0;0,9;0,9;0,75;0,75;0,75;0,75;0,5;0,25;0,1). Параметры модели  $\delta_1=0,3;\delta_2=0,15;\sigma_1=0,2;\sigma_2=0,05;\epsilon=0,05;\lambda=0,75$ . Используя формулы (6), получим вектор предельных влияний:

s = (0,3735; 0,4201; 0,0258; 0,0258; 0,0258; 0,0258; 0,0258; 0,0258; 0,0258; 0,0258; 0,0258), а итоговое мнение при консенсусе <math>sp(0) = 0,4999.

Определим, например, как должны меняться  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , чтобы для фиксированных значений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  предельное влияние  $s_1$  находилось в промежутке [0,5;0,9]. Подставляя значения  $\theta_1=0,5;\theta_2=0,9$  в формулу (7), получим  $0,0211 \leq 0,4875\delta_1+1,15\delta_2 \leq 0,19$ . Графическое решение данного неравенства приведено на рисунке.



Область изменения  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , при которых  $s_1 \in [0,5; 0,9]$ 

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рассмотренной модели социальной сети с двумя центрами влияния найдены условия достижимости консенсуса при динамике мнений, которая задается линейной стационарной системой. В случаях, когда консенсус не достигается, найдены схожие условия достижения консенсуса большинства. В явном виде получены предельные влияния участников социальной сети, по которым рассчитано итоговое мнение сети при консенсусе или итоговое мнение большинства. Найдены значения параметров социальной сети, когда ни консенсус, ни консенсус большинства не достигаются.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- DeGroot M.H. Reaching a Consensus // Journal of the American Statistical Association. 1974. Vol. 69, N 345. P. 118—121.
- Golub B., Jackson M.O. Naive Learning in Social Networks and the Wisdom of Crowds // American Economic Journal: Microeconomics. — 2010. — Vol. 2, N 1. — P. 112—149.
- Buechel B., Hellmann T., Klöbner S. Opinion dynamics and wisdom under conformity // Journal of Economic Dynamics & Control. — 2015. — Vol. 52. — P. 240—257.
- Буре В.М., Екимов А.В., Свиркин М.В. Имитационная модель формирования профиля мнений внутри коллектива // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 10: Прикладная математика, информатика, процессы управления. 2014. № 3. С. 93—98.
- 5. *Губанов Д.А.*, *Новиков Д.А.*, *Чхартишвили А.Г.* Модели информационного влияния и информационного управления в социальных сетях // Проблемы управления. 2009. № 5. С. 28—35.
- 6. *Губанов Д.А.*, *Новиков Д.А.*, *Чхартишвили А.Г.* Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит, 2010. 228 с.
- Grabisch M., Rusinowska A. A model of influence based on aggregation functions // Mathematical Social Sciences. 2013. Vol. 66. P. 316—330.
- 8. *Parilina E.*, *Sedakov A.* Stable cooperation in graph-restricted games // Contributions to Game Theory and Management. 2014. Vol. 7. P. 271—281.
- Чеботарев П.Ю., Агаев Р.П. Об асимптотике в моделях консенсуса // Управление большими системами. — 2013. — Вып. 43. — С. 55—77.
- Doob J.L. Stochastic Processes. N.-Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1990. — 664 p.
- Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1982. 256 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии П.Ю. Чеботаревым.

**Буре Владимир Мансурович** — д-р техн. наук, профессор,  $\boxtimes$  v.bure@spbu.ru,

Парилина Елена Михайловна — канд. физ.-мат. наук, доцент, ⋈ e.parilina@spbu.ru,

**Седаков Артем Александрович** — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель, ⊠ a.sedakov@spbu.ru,

Санкт-Петербургский государственный университет.



УДК 330.46 + 35 + 338.24.01

# СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И СОГЛАСОВАНИЕ ИНТЕРЕСОВ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫХ УЧАСТНИКОВ МЕГАПРОЕКТОВ

Н.И. Пляскина, В.Н. Харитонова

Отмечено, что на современном этапе структурных преобразований реального сектора экономики в Российской Федерации возросла актуальность стратегического управления реализацией комплексных многорегиональных и многоотраслевых мегапроектов, направленных на формирование нового инфраструктурного и индустриального базиса России, освоения природных ресурсов Арктики и Востока России, востребованных на мировых рынках. Подчеркнуто, что на первый план вышли проблемы эффективности государственного управления и согласования экономических интересов институциональных участников — частного бизнеса, государства и регионов. Предложены методический подход и инструментарий для разработки стратегии комплексных межрегиональных мегапроектов и управления их реализацией на основе принципов программно-целевого планирования, моделирования вариантов институциональных условий и механизмов государственной поддержки.

**Ключевые слова:** инвестиционный проект, мегапроект, сценарий, институциональные условия, стратегическое управление, программно-целевой подход, согласование интересов, государственная поддержка, сетевая модель, имитационная модель, инвестиционная программа.

#### ВВЕДЕНИЕ

Мегапроекты представляют собой единый системно организованный комплекс проектов взаимосвязанных отраслей, размещаемых на обширных территориях, охватывающих несколько субъектов Федерации, имеющих общегосударственное значение, большую стоимость и значительное число участников.

Цель формирования мегапроекта как объекта стратегического управления заключается в достижении в заданные сроки высокой экономической эффективности создаваемого межотраслевого комплекса как для государства, так и для всех его участников при высокой конкурентоспособности лидеров мегапроекта на мировом рынке.

Важное условие эффективности мегапроекта состоит в консолидации усилий и ресурсов участников для достижения как государственных стратегических, так и корпоративных целей. Создание мегапроектов преследует геополитические, макроэкономические, социально-экономические цели устойчивого развития Российской Федерации

и обеспечения национальной безопасности государства. Особая роль государства в формировании и реализации мегапроекта состоит в снижении технологических, геологических, экологических и экономических рисков участников, создании межрегиональной инфраструктуры и участии в инвестировании отдельных проектов. Региональные интересы при реализации мегапроекта заключается в получении значительных импульсов развитию сопредельных секторов на территориях, экономики сервиса и знаний. Как правило, базовые отрасли становятся ядром современных кластеров, потребителями и поставщиками товаров и услуг, центрами межрегионального экономического развития.

В первую очередь мегапроекты стали формироваться в сырьевых отраслях экономики, имеется большой класс межотраслевых территориальных мегапроектов («Комплексное развитие Нижнего Приангарья», «Комплексное развитие Забайкалья», «Комплексное развитие Южной Якутии»). Накануне кризиса 2008 г. в России планировалось к реализации более 110 мегапроектов на общую сумму более 500 млрд. долл., среди них 25 проектов предложено создать в рамках государственно-час-



тного партнерства при поддержке Инвестиционного фонда России [1]. Более половины будущих российских мегапроектов запланировано к реализации в азиатской части России: Урал, Сибирь, Дальний Восток — макрорегионы, где в ближайшие 15—20 лет прогнозируется экономический рост с созданием территорий опережающего развития.

В последние годы доминируют мегапроекты топливно-энергетического комплекса (Ямал, Сахалин, Восточная газовая программа) и многомиллиардные инфраструктурные мегапроекты (Олимпиада Сочи-2014, Универсиада в Казани 2013, инфраструктурный комплекс к саммиту АТС во Владивостоке — 2012), реконструкция Транссиба и БАМа. В европейской части страны создаются мегапроекты транспортной инфраструктуры («Западный скоростной диаметр» (г. Санкт-Петербург), автодорога «Москва — Петербург», которые окажут особенно заметное влияние на развитие Западного и Центрального округов.

Значительная часть российских мегапроектов относится к новым направлениям развития экономики: инноватике (Сколково) и туристическому бизнесу. В числе первоочередных инвестиционных мегапроектов туристско-рекреационного типа — «Комплексное развитие Алтайского Приобья и эффективное использование туристско-рекреационных активов юга Сибири». Он включает в себя 12 инвестиционных проектов общей стоимостью более 150 млрд. руб. Их реализация станет основой для развития четырех взаимосвязанных кластеров: агропромышленного, биофармацевтического, туристско-рекреационного и топливноэнергетического<sup>1</sup>.

Мегапроект как объект стратегического планирования и управления обладает следующими особенностями:

- сложный территориальный и отраслевой состав, разнонаправленность стратегических намерений регионов, отраслей и компаний;
- зависимость его структуры и состава от геополитических факторов;
- широкая зона неопределенности внешних и институциональных условий (нормативно-законодательной базы, налоговой системы, привлечение ресурсов свободного финансового рынка);
- значительные организационно-экономические и инновационные риски проектов;
- состязательность интересов и конкуренция отраслей и регионов за государственную поддержку и привлечение проектов на территорию.

<sup>1</sup> Зеленый свет для мегапроекта. — URL: http://www.interfax-russia.ru/Siberia/view.asp?id=209080 (дата обращения 8.02.11).

Система управления реализацией мегапроекта слабо ориентирована на эффективное достижение целевых результатов, а механизмы согласования управленческих решений компаний и государства непрозрачны и запутаны:

- наблюдаются частые нарушения достигнутых соглашений между государством и компаниями, нестабильность бюджетного финансирования проектов с государственным участием; следствием «мягких» обязательств является широкая зона неопределенности сроков реализации проектов компаний, удорожание стоимости мегапроекта и, в конечном итоге, разрушение его целостности;
- вне зоны стратегического управления мегапроектом оказывается подрядная деятельность, где концентрируются практически все инвестиционные и управленческие риски; непрозрачность конкурсов компаний на проведение подрядных работ обусловливает возможность реализации коррупционных схем получения подрядов на выполнение государственных заказов, завышения стоимости объектов строительства в счет проектных рисков;
- значительный перерасход государственных средств общая проблема практики реализации современных мегапроектов: так, совокупные инвестиции мегапроекта «Олимпиада Сочи 2014», по оценкам экспертов, составили 50 млрд. долл., что выше плановой стоимости в 5 раз. Превышение стоимости проектов отмечено как в крупных корпорациях-«инвесторах», так и у «подрядчиков», осваивающих средства бюджета и госкомпаний<sup>2</sup>.

Изложенное выше свидетельствует о нерациональности сложившейся системы стратегического управления, механизмов взаимодействия государства и бизнеса при реализации мегапроектов. Актуальна разработка единого методического подхода к стратегическому планированию и управлению мегапроектом с согласованием интересов его институциональных участников как субъектов хозяйствования с различной структурой собственности: федеральных и региональных органов власти, компаний.

Цель данной статьи — предложить методический подход и инструментарий разработки стратегии комплексных ресурсных мегапроектов на

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Олимпийцы Forbes: кто и сколько потратил на Сочи-2014 http://m.forbes.ru/article.php?id = 250265 О проклятии мегапроектов: Сочи-2014 и другие. 03 декабря 2013 года, 17:17 http://compulenta.computerra.ru/chelovek/economy/10010418/



основе принципов программно-целевого планирования и моделирования механизмов государственной поддержки их реализации.

#### 1. МЕСТО МЕГАПРОЕКТА В СИСТЕМЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В связи с выходом страны на траекторию восстановительного роста и актуализацией инновационно-прорывных сценариев развития России в федеральных органах государственной власти возродился интерес к применению методологии стратегического планирования и управления, обеспечивающих достижение программных национальных целей.

В связи с возросшей сложностью системы стратегического планирования возникают многоаспектные задачи согласования национальных, отраслевых и региональных стратегий как на стадии разработки, так и при их реализации. Интеграция экономики России в мирохозяйственную систему обусловливает необходимость адаптации системы принятия решений к глобализации перспективной инновационной и структурной политики.

В 2014 г. в практику государственного управления вошел ФЗ-172 «О Стратегическом планировании в Российской Федерации», в котором определены объекты и предметы, институты и порядок взаимодействия органов власти при организации разработок стратегических документов [2, раздел 1, n. 2]. Программно-целевое управление принято как основной инструмент достижения стратегических целей.

Система стратегического планирования определена в законе как механизм обеспечения согласованного взаимодействия ее участников при разработке документов, а также при мониторинге и контроле за их реализацией с использованием нормативно-правового, информационного, научнометодического, финансового и иного ресурсного обеспечения.

Отметим, что к настоящему времени такой механизм находится в стадии формирования. Утверждена многоуровневая структура стратегического планирования, адекватная иерархии государственного управления, которая имеет федеральный, региональный и муниципальный уровни. Каждому уровню управления соответствует собственный пакет разрабатываемых документов, информация и показатели которых служат входной информацией для разработки стратегических документов следующих уровней.

Для современных технологий стратегического планирования характерно следующее:

- множественность методологий разработки документов стратегического планирования и инструментария согласования интересов участников затрудняют реализацию системного подхода к выбору эффективных государственных стратегий управления;
- в явном виде не прописаны механизмы взаимодействия федеральных органов управления и частного бизнеса при разработке отраслевых и региональных стратегических документов;
- высока степень автономности изменений стратегических решений участников;
- длительность и итеративность процедур согласования экономических интересов участников;
- мегапроекты не являются объектами регулярных стратегических разработок.

В практике управления формированием мегапроектов стратегический подход присутствует только на стадии проектной проработки и, соответственно, для них не предусмотрены нормативные документы. Сохранен инициативный порядок подготовки документов государственного стратегического планирования мегапроектов. Как правило, инициатива исходит от научных организаций или структур гражданского общества, компаний или регионов, а решение о его разработке принимается Президентом или Правительством Российской Федерации. Государство обозначает свои цели, формирует систему институтов государственного финансирования мегапроектов и определяет объем государственных инвестиций на приоритетные проекты. Крупный бизнес, обладая квалифицированным инжинирингом, участвует в разработке стратегий и реализации собственных инвестиционных программ.

В структуре органов исполнительной власти отсутствует институт, функцией которого является стратегическое управление комплексными межотраслевыми мегапроектами, координация управленческих решений государства и бизнеса в ходе их реализации.

Опыт стратегического планирования межотраслевых мегапроектов выявил ряд проблем в организации рационального взаимодействия государственных органов управления и бизнеса:

• отсутствие «одного окна» — координатора мегапроекта в исполнительных органах власти федерального уровня — и инвестиционного плана развертывания мегапроекта во времени обусловливают множество итераций при согласовании стратегических решений участников мегапроекта и, как следствие, слабую согласованность потребностей в ресурсах с реальными объемами инвестирования компаниями и государством;



- сложность консолидации ресурсов компаний для выполнения целевых задач мегапроектов с учетом институциональных барьеров и возможностей привлечения инвестиционных ресурсов с финансового рынка;
- отсутствие модельного инструментария экономических оценок реализации альтернативных сценариев мегапроекта и последствий невыполнения принятых соглашений с компаниями;
- механизм согласования интересов осуществляется в виде предоставления преференций и государственной поддержки отдельным компаниям, нет системной координации мер поддержки бизнеса для достижения государственных целей мегапроекта.

#### Принятые сокращения:

АСППР — адаптивные системы поддержки принятия решений;

ВЦ РАН — Вычислительный центр имени А.А. Дородницына;

ИМ СО РАН — Институт математики им. С.Л. Соболева;

ИНП РАН — Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН;

ИНЭИ РАН — Институт энергетических исследований;

ИНЭС РАН — Институт экономических стратегий:

ИПУ РАН — Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова;

ИСЭМ СО РАН — Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН;

ИЭИ ДВО РАН — Институт экономических исследований ДВО РАН;

ИЭОПП СО РАН — Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН;

ЛПР — лицо, принимающее решение;

МИСК — Международный институт Питирима Сорокина — Николая Кондратьева;

OMMM — оптимизационная межотраслевая многорегиональная модель;

РАГС — Российская академия государственной службы при Президенте РФ;

СИРЕНА — синтез региональных и народно-хозяйственных решений;

СОНАР — согласование отраслевых и народнохозяйственных моделей;

СУРР — структура проектного управления инновационным развитием региона;

ТЭК — топливно-энергетический комплекс; ЦЭМИ РАН — Центральный экономико-математический институт РАН;

ЧДД — чистый дисконтированный доход.

Своеобразное решение этих проблем в научных кругах состоит в переходе к концепции проектной экономики, в которой развитие национальной экономики представлено в виде совокупности крупных межотраслевых проектов, направленных на достижение стратегических целей социально-экономического развития (коллективов ряда институтов РАН: ЦЭМИ, ИНЭС, ИПУ, ИНЭИ, ИЭОПП, ИСЭМ и др.). Такое решение дает возможность применения программно-целевых методов организации управления межотраслевыми проектами и позволяет настроить механизмы государственного регулирования решения локальных задач на достижение программных целей. Представляется целесообразным в иерархической структуре государственного стратегического планирования выделить мезоуровень, где происходит разработка программ развития макрорегионов<sup>3</sup> и крупных комплексных межотраслевых многорегиональных мегапроектов. Соответственно, здесь необходимо организовать свод и согласование государственных, отраслевых и региональных прогнозов социально-экономического развития, взаимодействие с бизнес-стратегиями отраслевых компаний, субъектов Федерации. Для повышения эффективности технологий организации согласования и координации информационных потоков требуется создание координационных центров с аппаратом ситуационного анализа принятия управленческих решений.

Именно на мезоуровне разработки документов стратегического планирования появляются инвестиционные проекты как объекты планирования и соответственно бизнес-субъекты, заинтересованные в реализации проектов, становятся прямыми институциональными участниками разработки государственных стратегий и федеральных целевых программ. На этом уровне появляется возможность оценить:

- потребность программы в инвестиционных ресурсах для решения целевых задач и коммерческую эффективность бизнес-проектов;
- участие бизнеса в формировании финансовых ресурсов и его вклад в реализацию федеральных и региональных проектов;

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Макрорегион включает в себя территории двух и более субъектов РФ, социально-экономические условия в пределах которых требуют выделения отдельных направлений, приоритетов, целей и задач социально-экономического развития при разработке документов стратегического планирования. В последние годы макрорегионы становятся объектами стратегического планирования, разработаны федеральные целевые программы их развития (ФЦП «Юг России» (2014—2020); ФЦП «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Забайкалья на период до 2018 года»).



- реализуемость государственных приоритетов в смысле ресурсной обеспеченности;
- направления и проекты государственно-частного партнерства, объемы государственной поддержки бизнес-проектов в мегапроектах и федеральных целевых программах макрорегионов.

Таким образом, на мезоуровне возможно решение задач трансформации прогнозов и стратегий развития отраслей и макрорегионов в комплексные мегапроекты и федеральные целевые программы с согласованием участия бизнеса по обеспечению финансовыми ресурсами целевых стратегических задач.

#### 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И МОДЕЛЬНЫЙ АППАРАТ СИСТЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Качество функционирования системы стратегического планирования определяется научным инструментарием, применяемым для ее разработки и адаптации системы государственного регулирования для управления деятельностью по достижению стратегических целей. В России накоплен богатый модельный арсенал централизованного долгосрочного планирования, разработаны комплексы макро- и мезомоделей, оптимизационных межрегиональных моделей пространственного развития экономики. Развита методология программно-целевого планирования и управления реализацией крупных проектов с помощью сетевых моделей, программное обеспечение анализа и принятия решений в рамках планирования и осуществления межотраслевых инвестиционных программ освоения и социально-экономического развития регионов.

Работы по адаптации научно-методологических подходов и развитию модельного инструментария разработки и реализации стратегий долгосрочного социально-экономического развития России в условиях глобализации рынков, динамичности структурных преобразований и структур корпоративного управления ведутся научно-исследовательскими коллективами РАН — ЦЭМИ, ИНП, ИНЭС, ИПУ, ИЭОПП СО и др.

Значительную роль в консолидации российских научных исследований по системному моделированию управления экономикой страны, регионов, крупных корпораций и холдингов играют ежегодные международные научные конференции по управлению развитием крупномасштабных систем, организованные Институтом проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН под руководством директора Института академика С.Н. Васильева и д-ра техн. наук А.Д. Цвиркуна [3]. Основной пред-

мет обсуждения — механизмы стратегического управления, а также модельный инструментарий отражения институциональных условий и их влияния на развитие и эффективность крупномасштабных и сложных систем.

Вышедшая в 2015 г. монография [4] представляет собой своеобразную квинт-эссенцию теоретических и прикладных результатов в области моделирования управления национальной экономикой, в ней представлен широкий спектр моделей различных уровней иерархического управления: модели глобального финансового рынка и рынка биржевых товаров, вычислительные модели общего равновесия (CGE models), модели частичного равновесия (региональные, отраслевые, корпоративные и др.), модели управления развитием топливно-энергетическими, транспортными и другими системами, агентно-ориентированные модели для исследования рыночных механизмов управления развитием дерегулированной электроэнергетики, позволяющих создать адекватную инвестиционную мотивацию субъектов рынка в централизованной конкурентной среде с неэластичным спросом, модели инвестиционных проектов и программ, модели стресс-анализа и разработки планов действий в кризисных ситуациях.

В целях определения направлений совершенствования технологий стратегического планирования нами систематизированы подходы по уровням иерархии, задачам, целевым результатам и результирующим документам (см. таблицу). С точки зрения решения задач стратегического управления принципиальное отличие методологических подходов состоит в способах отражения в модельном инструментарии совокупности институциональных условий функционирования рынка: экзогенные — задаются в виде нормативов и ограничений; эндогенные — формируются в моделях.

Проведенный нами анализ современных научно-методологических подходов выявил следующие акценты в развитии инструментария стратегического планирования и управления для адекватного отражения институциональных условий рыночной экономики и интересов бизнеса.

- Признание необходимости экспертов и независимой комплексной экспертизы на всех стадиях разработки стратегических документов: от формирования целей и приоритетов, прогнозов научно-технологического и пространственного развития до разработки целевых программ.
- Моделирование цикличности развития рыночной экономики и включение экспертных процедур форсайт-прогноза влияния инновационных технологических изменений на структурные сдвиги и динамику социально-экономического развития.



#### Современные научно-методологические подходы и инструментарий стратегического планирования и управления в Российской Федерации

Уровень управления, координирующий орган, документ стратегического планирования	Методологиче- ский подход, задачи	Инструментарий	Учет институциональных факторов	Результат	Разра- ботчик	
1	2	3	4	5	6	
	Стратегическое планирование					
I. Макроэкономический Правительство РФ Прогноз научнотехнологического развития РФ	I.1. Межотраслевой кластерный подход к инновационной индустриализации России на основе анализа общемировых тенденций	Система макро- экономических и межотраслевых балансовых моделей	Эндогенные: институциональные аспекты мировых интеграционных процессов	Концепция инновационной индустриализации, прогноз и механизмы технологического развития России	ИНП РАН [20]	
Долгосрочный прогноз развития экономики России на 2007—2030 гг.  Стратегия социально-экономического развития РФ	I.2. Междисциплинарный подход. Интегральное макропрогнозирование и национальное программирование: инновационнотехнологический подход. Задача: формирование инновационнопрорывного сценария и приоритетов структурной политики	Построение цивилизационной матрицы на основе теории циклов, кризисов и инноваций Н.Д. Кондратьева; социально-культурной динамики П.А. Сорокина; межотраслевого анализа и прогнозирования В.В. Леонтьева; воспроизводственно-цикличной макромодели Ю.В. Яковца	Варианты институциональных условий на основе форсайт-прогноза экспертов: государственное регулирование рыночной экономики	Макропрогноз инновационно- технологической и структурной динамики: оценка влияния основных факторов и ограничений. Долгосрочная государственная стратегия. Перечень национальных программ и проектов, механизмы их реализации	ИНЭС РАН [6, 7]	
Стратегия пространственного развития РФ  Стратегии развития отраслей РФ: энергетическая; транспортная и др.	I.3. Долгосрочное прогнозирование пространственного развития экономики отраслей и регионов. Задача: формирование альтернативных сценариев интеграции регионов в мирохозяйственную систему I.4. Проектный подход. Задача: формирование состава крупных комплексных проектов для достижения стратегических целей экономики	Модельно-программный комплекс оптимизационных многорегиональных межотраслевых моделей (СОНАР, СИРЕНА)	Экзогенные: технологические коэффициенты ресурсоемкости отраслей; государственные приоритеты во внешнеэкономической деятельности; отраслевые темпы роста; региональные предпочтения в привлечении новых производств и др.	Сценарии развития отраслей и регионов, межрегиональных взаимодействий. Приоритетные направления структурной и инвестиционной политики государства	ИЭОПП СО РАН [8, 9]	

См. далее продолжение таблицы



- Развитие проектного подхода и математического аппарата комплексных оценок национальных и корпоративных приоритетов крупных проектов в моделях макроэкономического долгосрочного планирования и прогнозирования.
- Программно-целевое управление реализацией государственных программ на основе адаптации функций административных структур государственного управления к решению программных задач и мониторингу результативности их выполнения.
- Согласование стратегических интересов участников комплексных программных проектов и федеральных целевых программ на основе учета и оценок влияния институциональных условий и механизмов государственного регулирования на поведение и стратегические решения бизнеса

Решение прикладных задач государственного стратегического управления оказало влияние, на наш взгляд, на концентрацию теоретических исследований ведущих институтов РАН преимущественно на национальном и региональном уровнях стратегического планирования и управления в рыночной экономике.

На макроуровне приоритетное направление — интегральное макропрогнозирование на основе междисциплинарного подхода и построение инновационно-прорывных сценариев развития РФ с учетом геополитических факторов и циклических закономерностей функционирования мировой рыночной экономики. В ИНП РАН<sup>4</sup> разработаны концепция инновационной индустриализации и «Прогноз технологического развития России с учетом новых мировых интеграционных процессов (технологические, экономические и институциональные аспекты)», перспективы и механизмы технологического развития на основе кластерного подхода [5].

При разработке долгосрочного прогноза использовались две группы моделей:

- макроэкономические модели для формирования сценариев на основе анализа наиболее общих пропорций, ограничений и эластичностей;
- система межотраслевых и балансовых моделей, позволяющих получить согласованные количественные оценки динамики и структуры производства на долгосрочную перспективу в разрезе отраслей, регионов и межотраслевых комплексов.

Особенность предложенного инструментария заключается в наличии системы отлаженных и согласованных моделей, позволяющих любому за-интересованному исследователю воспроизвести

все прогнозные расчеты по альтернативным сценариям.

Для адекватного прогнозирования инновационных структурных сдвигов, оценки рисков, геостратегических и национальных интересов России в ИНЭС РАН разработана воспроизводственно-цикличная макромодель, применяются методы форсайт-прогнозов технологических укладов и вариантов институциональных условий [6, 7].

Для формирования альтернативных сценариев интеграции регионов Российской экономики в мирохозяйственную систему в ИЭОПП СО РАН модифицированы модельно-программные комплексы долгосрочного прогнозирования пространственного развития национальной экономики: СОНАР (согласование отраслевых и народнохозяйственных моделей с оценкой основных тенденций развития многоотраслевых комплексов и отдельных отраслей в системе народного хозяйства) и СИРЕНА (синтез региональных и народнохозяйственных решений, направленных на изучение взаимодействия регионов и пространственного развития экономики) [8, 9]. Разработаны методические подходы и модельный аппарат комплексного оценивания влияния крупных народнохозяйственных и отраслевых проектов на социально-экономическое развитие страны и ее регионов на основе адаптации оптимизационных многорегиональных межотраслевых моделей пространственного развития экономики [10, 11]. В эти модели включены финансовые блоки, что позволяет исследовать влияние на макроэкономические показатели таких экзогенных институциональных факторов, как государственные приоритеты во внешнеэкономической деятельности и выборе структуры фонда накопления; предпочтения бизнеса в развитии отраслей; региональных предпочтений в привлечении новых производств и др.

В ЦЭМИ РАН. ИЭОПП СО РАН и ИПУ РАН развиваются концепции проектной экономики для организации взаимодействия бизнеса и власти в достижении стратегических целей экономики России. По мнению акад. В.Л. Макарова, инструментарий проектной экономики позволяет четко сформулировать цели, определить необходимый и достаточный состав инвестиционных проектов, выстроить сетевой график работ, согласовать сроки, объемы и источники финансирования. Предложена концепция отбора перспективных проектов и технологии их исполнения [12]. Преимущество подхода — возможность организации независимой экспертизы целей, задач и механизмов финансирования с точки зрения достижения стратегических целей комплексных народнохозяйственных проектов, инвестиционной привлекательности приоритетных отраслевых бизнес-проектов [13].

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Головная организация по комплексному прогнозу технологического развития экономики России в фундаментальных исследованиях Президиума РАН.



Продолжение таблицы

Уровень управления, координирующий орган, документ стратегического планирования	Методологический подход, задачи	Инструментарий	Учет институци- ональных факторов	Результат	Разра- ботчик
1	2	3	4	5	6
Межведомственные комиссии при Правительстве РФ Перечень проектов федеральных целевых программ	I.4. Проектный подход. Задача: формирование состава крупных комплексных проектов для достижения стратегических целей экономики				
	I.4.2. Оценка влияния механизмов государственной поддержки инновационных проектов на макроэкономические показатели развития экономики страны	ОМММ с встроенным блоком финансово-экономической оценки проектов	Экзогенные: варианты государ- ственных префе- ренций для обеспе- чения финансовы- ми ресурсами и нормативной рентабельности инновационного проекта	Оптимальный вариант макроэкономической динамики и государственной поддержки крупного инновационного проекта	ИЭОПП СО РАН [14]
	I.4.3. Оценка долго- срочных социально- экономических по- следствий реализа- ции крупных народ- нохозяйственных проектов для разви- тия экономики страны и регионов		Экзогенные: варианты динамики инвестиций отраслевых компа- ний по регионам; структура фонда накопления	Прогноз изменений национального фонда потребления и прирост ВРП в разрезе федеральных округов и субъектов федерации; межрегиональные экономические связи	ИЭОПП СО РАН [10, 11]
	I.4.4. Комплексный подход к построению систем управления федеральными программами: мультипроектное управление и бюджетирование. Задача: распределение ресурсов между федеральными программами	Когнитивное моделирование результативных систем управления инновационным развитием отраслей и регионов: когнитивная карта	Эндогенные: комплексные оценки результативности достижения поставленных целей; государственные, отраслевые и региональные приоритеты	Матричная организационная структура проектного управления. Распределение бюджетных ресурсов на инновационные программы. Проектный центр управления	ИПУ РАН [18, 19]

См. далее продолжение таблицы



В русле концепции проектной экономики в ИЭОПП СО РАН предложен подход к оценке эффективности и выбору форм государственной финансовой поддержки комплексных инновационных проектов с использованием оптимизационной многорегиональной межотраслевой модели со встроенным блоком финансово-экономической оценки проекта [14]. В целом исследователи ИЭОПП СО РАН придерживаются экзогенного учета институциональных условий, идет подбор вариантов государственной поддержки и экономической политики, обеспечивающих оптимальные показатели экономического роста и качества жизни населения. Функционирование институтов управления находится вне зоны прямого моделирования.

В ИПУ РАН разрабатывается агрегативно-декомпозиционный подход проектирования структур сложных (крупномасштабных) систем, в котором формируется модель принятия управленческих решений [4]. Этот подход включает в себя комплексное исследование различных структурных аспектов процессов развития и функционирования крупномасштабных систем от выбора целей, процедур принятия решений и обработки информации до технологических процессов в динамике их функционирования и развития. Подход основан на использовании взаимосвязанного комплекса моделей различного типа: оптимизационных, имитационных, оптимизационно-имитационных, расчетных и др. В настоящее время построение системы управления разработано для развития и функционирования крупномасштабных систем на уровне предприятий и групп предприятий на основе многоуровневых динамических оптимизационных и имитационных моделей и итеративных процедур выбора рациональных вариантов развития системы.

Необходимость корректного учета динамических изменений объектов управления внешней среды при разработке стратегических управленческих решений, механизмов государственного регулирования и преференций для участников крупных комплексных проектов обусловливает целесообразность создания на разных уровнях государственной иерархии ситуационных центров анализа и принятия стратегических решений с участием экспертов. Наиболее продвинуты в этом направлении исследования в ИЭОПП СОРАН на уровне субъекта Федерации. Предложена интерактивная система разработки региональных управленческих решений на основе имитационных моделей развития нефтегазового комплекса с оценками влияния его институциональных условий на прирост доходов регионального и федерального бюджетов,

социально-экономическое развитие сырьевого региона [15].

Эффективность функционирования ситуационных центров непосредственно зависит от математического и алгоритмического обеспечения АСППР. Основные инструменты АСППР — средства мониторинга, ситуационного анализа и прогнозирования с помощью моделей, методов и алгоритмов оценки рисков - позволяют формировать многовариантные прогнозные оценки развития ситуации с учетом принимаемых решений и других сценарных условий и выбрать наилучшие управленческие решения. Алгоритмы синтеза математических моделей и информационных модулей различных типов исходной информации на основе экспертных процедур и предпочтений лица, принимающего решение, предложены в работе [16].

Региональный аспект методологии стратегического планирования на различных уровнях территориальной иерархии (с выделением межрегионального уровня) и акцентом на вовлечение в эти процессы институтов гражданского общества разрабатывается в ИЭОПП СО РАН [17]. Предлагается совершенствование региональной политики на основе взаимосвязанного комплекса институциональных условий с учетом прямого и косвенного участия институтов гражданского общества и бизнес-структур в виде перспективных бизнеспланов крупных корпораций.

На основе оптимизационной многорегиональной межотраслевой модели в разрезе федеральных округов и субъектов Федерации определяются стратегические направления развития субъектов Федерации, что позволяет обеспечить преемственность стратегий федерального, регионального и муниципального уровней. При разработке стратегии федерального округа на макроуровне определяются стратегические направления развития и основные правила игры государства и частного бизнеса, устанавливаются сферы их влияния и ответственности государства и бизнеса. Формирование институциональных условий для реализации региональных стратегических приоритетов и достижения баланса интересов государства и бизнес-структур осуществляется посредством соглашений на уровне субъекта Федерации. Предложены состав и структура типовой стратегии субъекта Федерации, включающая в себя механизмы реализации и контроль институциональных условий.

Несмотря на то, что в современной системе государственного управления региональным развитием федеральные и региональные целевые программы продекларированы как основной инструмент достижения стратегических целей субъекта Федерации, реализация целевых программ натал-



кивается на серьезные противоречия с существующей системой финансирования, контроля, мониторинга и оценки эффективности управленческих решений, ориентированных на среднесрочные и текущие цели.

В этой связи представляется крайне актуальным продвижение в практику государственного и муниципального стратегического управления разработок ИПУ РАН по формированию организационных СУРР. Предложены технологии разработки матричной организационной структуры проектного управления в администрациях субъекта Федерации и муниципалитетах на основе когнитивного моделирования. Когнитивные карты, основными элементами которых служат базисные факторы и причинно-следственные связи между ними, позволяют оценить влияние результатов конкретной программы на целевые показатели региона. Матричные свертки целевых показателей используются для комплексных оценок результативности достижения поставленных целей, отражающих приоритеты в развитии региона. На их основе осуществляется распределение бюджетных ресурсов на инновационные программы развития региона методами сетевого планирования и управления с минимизацией затрат на достижение целей [18, 19]. Достоинство подхода состоит в формировании эндогенных институциональных условий и механизмов реализации проектов с участием бизнес-сообщества и общественных организаций.

На мезоуровне при развитом инструментарии разработки долгосрочной стратегии макрорегиона наименьшие продвижения достигнуты в разработке технологии и механизмов координации управленческих решений институциональных участников: бизнеса и государства (федеральных и региональных органов власти). Модельные комплексы разработки стратегии макрорегиона ИНП РАН [20] и [21] основаны на синтезе научно-технологического и общеэкономического подходов. Модельный инструментарий ИНП РАН представлен сочетанием отраслевых эконометрических и межотраслевых балансовых моделей, что позволяет количественно оценить динамику технологических изменений экономики макрорегиона на основе показателей продуктивности первичных ресурсов. Особенность инструментария ИЭИ ДВО РАН применение методов форсайт-прогноза вариантов институциональных условий и механизмов взаимодействия государства, бизнеса и науки, необходимых для прогрессивных технологических сдвигов в отраслях региона. Используемый инструментарий позволяет разрабатывать сценарные прогнозы динамики структурных сдвигов отраслей макрорегиона при различных экзогенных вариантах институциональных условий и на их основе

сформировать рекомендации — направления институциональных трансформаций, благоприятные для достижения стратегических целей его развития.

Отметим, что, несмотря на разнообразие подходов к решению задач стратегического планирования и управления, они применяются преимущественно для научного прогноза и анализа развития экономики России, но не служат методическим инструментарием технологии стратегического планирования при разработке правительственных решений.

Проведенный анализ подходов и инструментария стратегического планирования и управления показал, что при разработке научных прогнозов делается попытка системного подхода к формированию институциональных условий в иерархической организации стратегического планирования.

На народнохозяйственном уровне при разработке долгосрочных прогнозов развития экономики России преобладает эндогенный подход к формированию общих принципов и задач институциональных трансформаций для обеспечения инновационного развития отраслей. Эти принципы ложатся в основу разработки экзогенных вариантов институциональных условий при долгосрочном прогнозировании пространственного развития экономики отраслей и регионов с оценкой долгосрочных социально-экономических последствий реализации крупных народнохозяйственных проектов. По мере продвижения от макро- к региональному уровню в модельном инструментарии конкретизируются направления институциональных трансформаций в виде вариантов государственных преференций проектам инвестиционной программы крупных народнохозяйственных проектов или макрорегиона. На уровне макрорегиона, как правило, оцениваются экзогенные экспертные варианты институциональных условий в альтернативных сценариях структурных сдвигов научно-технологических прогнозов стратегий развития макрорегионов и разработки федеральных целевых программ. Набор заданных институциональных условий формируется на основе методов форсайт-прогноза и экспертного оценивания влияния этих условий на структурные сдвиги в макроэкономике.

На мезоуровне нерешенными задачами разработки комплексных мегапроектов остаются развертывание сценариев развития макрорегионов в федеральные целевые программы и межрегиональные комплексные мегапроекты, проектирование институциональных условий и механизмов государственной поддержки бизнес-проектов, ориентированных на достижение целевых результатов.



Продолжение таблицы

Уровень управления, координирующий орган, документ стратегического планирования	Методологический подход, задачи	Инструментарий	Учет институци- ональных факто- ров	Результат	Разра- ботчик
1	2	3	4	5	6
II. Мезоуровень	II.1. Долгосрочное прогнозирование	Модельный комплекс:	Эндогенные: экспертные	Сценарный прогноз динамики структур-	ИЭИ ДВО РАН
Правительство РФ Министерства РФ по развитию макрорегионов России Стратегия развития макрорегиона Федеральные целевые програм-	развития макрорегиона: синтез научнотехнологического и общеэкономического подхода. Задача: разработка долгосрочной стратегии макрорегиона	<ul> <li>отраслевые</li> <li>эконометриче-</li> <li>ские и межотрас-</li> <li>левая балансовая</li> <li>модели;</li> <li>форсайт-про-</li> <li>гноз механизмов</li> <li>взаимодействия</li> <li>государства,</li> <li>бизнеса и науки</li> <li>с учетом научно-</li> <li>технологических</li> </ul>	варианты институциональных условий в альтернативных сценариях структурных сдвигов спроса и предложения с учетом научно-технологических прогнозов	ных сдвигов отраслей макрорегиона; направления институциональных трансформаций	[21]
мы макрорегио- нов РФ: «Дальнего Востока и		прогнозов развития стран АТР			
востока и Забайкалья на период до 2018 года» Стратегия формирования и реализации межотраслевого мегапроекта	II.2. Стратегическое планирование и управление сложными крупномасштабными системами (мегапроектами). Задачи: согласование интересов институциональных участников; формирование механизмов стратегического управления сложной системой	Комплекс много- уровневых моде- лей управления сложными систе- мам с взаимо- связями структур- ных моделей объектов и моде- лей механизмов управления; комплекс оптими- зационных, имитационных, расчетных, гетерогенных и других моделей	Эндогенные: параметры меха- низма управления формируются в зависимости от уровня дости- жения стратеги- ческой цели мегапроекта вариантов госу- дарственных преференций корпоративным проектам инвес- тиционной программы	Стратегия развития сложной крупно-масштабной системы, приемлемая по эффективности для государства, корпораций и компаний. Механизмы координации управленческих решений институциональных участников, параметры управления	ИНП РАН [20] ИПУ РАН [3]
	II.3. Стратегическое планирование и управление мегапроектами: сценарный подход. Задача: согласование интересов институциональных участников мегапроекта; формирование механизмов государственной поддержки компаний	Модельный комплекс разработки эффективной стратегии и инвестиционной программы многорегионального межотраслевого мегапроекта	Эндогенные: формирование вариантов госу- дарственных преференций проектам ин- вестиционной программы	Стратегия реализации мегапроекта, приемлемая по эффектвности для государства, субъектов Федерации и компаний. Пространственная организация мегапроекта. Механизмы государственной поддержки. Координационный центр управления разработкой стратегии	ИЭОПП СО РАН [23]

См. далее продолжение таблицы



#### 3. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СТРАТЕГИЧЕСКОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ РЕСУРСНЫМИ МЕГАПРОЕКТАМИ

Как показывает зарубежный опыт, успешность и эффективность реализации мегапроекта зависит от качества подготовки инвестиционной программы развертывания мегапроекта во времени, согласования интересов государства и бизнеса, схем и форм участия стратегических инвесторов в финансировании на основе применения программно-целевого планирования и мультипроектного управления [22]. В стратегических мегапроектах базовый принцип в организации процедур согласования интересов участников состоит в компромиссе между государством и бизнесом на разных уровнях управления. Он позволяет адекватно отразить независимость экономического статуса бизнеса и ограниченность полномочий государственных органов власти.

Инвестиционная программа мегапроекта представляет собой продукт согласования интересов участников. В процессе согласования выявляются возникающие противоречия и четко прописываются возможные пути их разрешения, которые фиксируются в договорах между государством и участниками мегапроекта. Уже на стадии разработки создается координирующий орган управления мегапроектом.

Предлагаемый нами методический подход основывается на системе моделей долгосрочного планирования мегапроекта, которые отражают особенности его формирования и функционирования в современной институциональной среде, позволяют оценить множество альтернативных сценариев и инвестиционных проектов участников с учетом геополитических факторов, неопределенности и вероятностного характера ожидаемых экономических, экологических и социальных эффектов, влияния организационно-экономических факторов на результативность мегапроекта.

# 3.1. Задачи стратегического планирования мегапроекта

Стратегическое планирование мегапроекта предусматривает решение следующих задач:

- обоснование целевых установок и разработка альтернативных сценариев мегапроекта: отраслевой и территориальной структуры, потенциальных направлений развития межотраслевых кластеров в субъектах Федерации;
- определение ядра мегапроекта как устойчивой совокупности проектов отраслей, их компаний и регионов, границ зоны устойчивости мегапроекта при изменениях стратегических намере-

ний компаний выхода на внутренний и мировые рынки;

- формирование стратегии и инвестиционной программы мегапроекта и организационно-экономических условий концентрации федеральных, региональных и корпоративных ресурсов различных отраслей для обеспечения сбалансированности и эффективности:
- разработка механизмов государственного регулирования реализации сформированной стратегии.

Определяющая роль в решении этих задач принадлежит государственным органам управления Министерствам и федеральным агентствам. На стадии формирования инвестиционной программы создается координирующий орган, функции которого заключаются в разработке:

- сценариев и концепции мегапроекта с прогнозными оценками ожидаемых долговременных экономических эффектов;
- состава участников, выявление их целей, инвестиционных намерений, степени участия и ожидаемых эффектов;
- инвестиционной программы мегапроекта;
- схем финансирования и форм участия стратегических инвесторов-участников мегапроекта;
- договоров с участниками и регламентацией их обязательств по реализации мегапроекта.

На стадии формирования инвестиционной программы необходимо иметь множество вариантов корпоративных инвестиционных стратегий с прогнозными оценками экономической и коммерческой эффективности проектов в условиях широкой зоны неопределенности и динамичности конкурентной среды на внутренних и внешних рынках.

В организации согласования интересов участников необходимо учитывать, что компании, обладая собственными материальными и финансовыми ресурсами, склонны к изменению приоритетов и выходу из мегапроекта. Предметом согласования интересов является выбор вариантов схем финансирования проектов, привлечения государственных инвестиций, внешних кредитов и займов, реинвестирования доходов, интеграции активов компаний для реализации инвестиционных проектов, а также учет институциональных барьеров межотраслевого перелива капитала.

Центральное место отводится разработке вариантов государственных преференций и государственной поддержки проектов и компаний, взаимоприемлемых для участников, консолидации их ресурсов на реализацию мегапроекта.

На стадии стратегического управления реализацией мегапроекта координирующий орган осуществляет мониторинг и анализ реализации ин-



вестиционной программы мегапроекта, контролирует выполнение государственных контрактов, формирует вариантные прогнозные оценки развития ситуации и разрабатывает рекомендации по согласованию управленческих решений участников.

#### 3.2. Организационно-технологическая схема стратегического планирования мегапроекта

В соответствии с изложенными принципами нами предложена организационно-технологическая схема стратегического планирования мегапроекта, в которой отражены поэтапная последовательность решения задач и адекватный им модельный инструментарий (см. рисунок). В ней предусмотрены следующие этапы:

- разработка сценариев мегапроекта;
- формирование портфеля инвестиционных проектов;
- выбор эффективной стратегии реализации мегапроекта.

Инструментарий, применяемый в организационно-технологической схеме, опирается на систему моделей долгосрочного прогнозирования ИЭОПП СО РАН и представляет собой сложный модельный комплекс, состоящий из моделей разных классов: оптимизационных макроэкономических, имитационных моделей формирования портфеля инвестиционных проектов, сетевой модели инвестиционной программы и имитационной модели оценки эффективности вариантов программы и мер государственной поддержки мегапроекта при различных сценариях его реализации [23]. Факторы и условия формирования мегапроекта отражают развитие внешней среды и учитываются в качестве ограничений либо входных параметров моделей.

В имитационном режиме ОМММ и ОМММ ТЭК позволяют сформировать сценарии и определить контуры мегапроекта: отраслевую и территориальную структуру, размещение производственных мощностей по регионам и их межрегиональные связи, а также оценить инвестиционные потребности мегапроекта, его долю в прогнозируемом фонде накопления страны как источнике инвестиционных ресурсов.

При разработке альтернативных сценариев приоритетными становятся анализ влияния внешних конкурентных условий, глобальных геополитических и социально-экономических факторов и оценка конкурентоспособности лидеров мегапроекта на мировом рынке. Контуры мегапроекта могут быть также сформированы и на основе концепций социально-экономического развития РФ, стратегических документов отраслей, регионов и компаний.

Модели формирования портфеля инвестиционных проектов компаний представляют собой совокупность моделей финансово-экономической оценки с учетом влияния налогового, ценового регулирования и других институциональных условий на коммерческую, бюджетную и интегральную эффективность проекта. Здесь проигрываются варианты инвестиционных намерений и ресурсных ограничений участников. Ядро мегапроекта образует устойчивая совокупность инвестиционных проектов компаний, имеющих приемлемые показатели коммерческой эффективности и обеспечивающие достижение целевых показателей мегапроекта. Эти модели служат генераторами входной информации для сетевой модели инвестиционной программы мегапроекта.

Эффективная стратегия реализации сценария мегапроекта выбирается с помощью разработанного авторами модельного комплекса, состоящего из сетевой модели инвестиционной программы мегапроекта и имитационной модели оценки эффективности инвестиционной программы при различных режимах государственного регулирования.

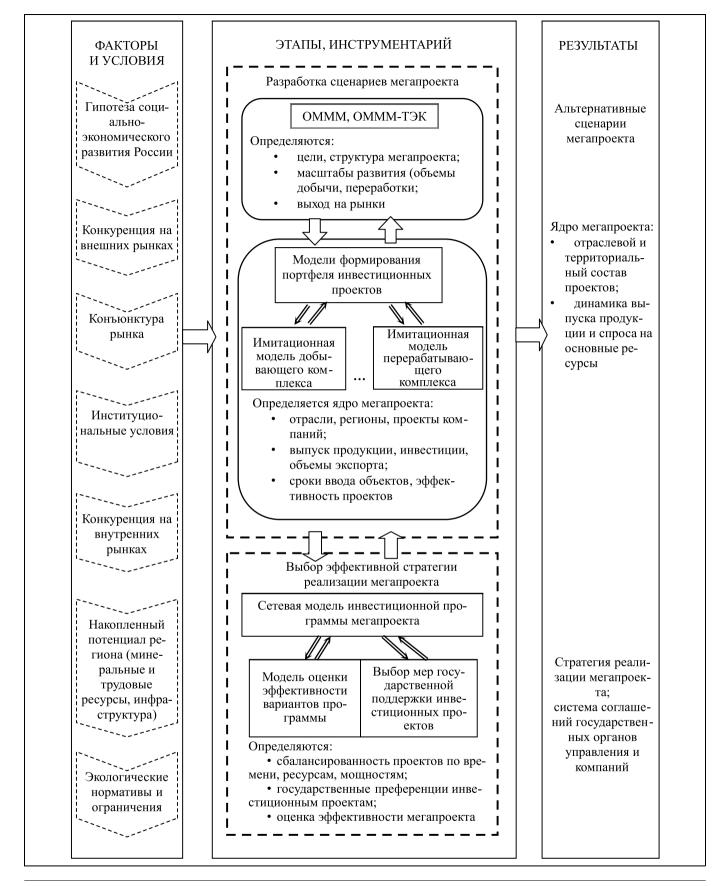
Сетевая модель инвестиционной программы мегапроекта как модель управления предназначена для согласования инвестиционных проектов различных отраслей по срокам и ресурсам, при которых обеспечивается выполнение поставленных целей в заданные директивные сроки. Она позволяет:

- эшелонировать альтернативные сценарии мегапроекта в динамике с учетом ограничений инвестиционных ресурсов компаний, а также бюджетных ограничений федеральных и региональных органов власти;
- определить сбалансированность спроса и предложения ресурсов технологически взаимосвязанных инвестиционных проектов компаний различных отраслей;
- оценить реализуемость сценариев и сформировать стратегию реализации мегапроекта;
- определить календарный план выполнения инвестиционной программы мегапроекта с учетом ресурсных ограничений компаний для анализируемого сценария.

Для управления инвестиционной программой мегапроекта используются индикаторы сбалансированности:

- синхронность ввода мощностей технологически взаимосвязанных проектов комплексного освоения ресурсов разных компаний;
- баланс (межотраслевые невязки) спроса и предложения инвестиционных ресурсов мегапроекта в динамике (федеральных, региональных и корпоративных ресурсов).





Организационно-технологическая схема стратегического планирования мегапроекта



Посредством индикаторов сбалансированности на основе анализа структуры критического и совокупности «подкритических» путей календарного плана мегапроекта в сетевой модели определяются:

- допустимые границы невязок по ресурсам, а также резервы времени реализации локальных проектов компаний;
- «узкие места» совокупность «критических» проектов, сдерживающих достижение целевых задач мегапроекта, заданных в виде директивных календарных сроков реализации всей инвестиционной программы;
- размеры дефицита инвестиционных ресурсов у компаний на различных этапах инвестиционной программы мегапроекта.

Инвестиционная программа мегапроекта определяется как результат решения задачи оптимизации ресурсно-календарного плана при ограниченных инвестиционных ресурсах участников<sup>5</sup>. Программно-математическое обеспечение решения большеразмерной задачи оптимизации ресурсно-календарного плана инвестиционной программы разработано в ИМ СО РАН [24]<sup>6</sup>.

Центральное место в выборе эффективной стратегии государственной поддержки мегапроекта занимает имитационная модель оценки эффективности вариантов межотраслевой инвестиционной программы с позиций интересов государства, регионов и компаний. Данная задача является многокритериальной, каждый участник имеет свой критерий. Для государства критерием эффективности реализации мегапроекта служит максимум ВВП при соблюдении условий рационального природопользования и обеспечение национальной безопасности страны, для регионов — максимум ВРП и бюджетных доходов, для компаний — рентабельность проекта.

Варьируемыми параметрами являются цены, налоговые режимы, преференции и другие меры государственной поддержки инвестиционных про-

ектов компаний, направленные на повышение инвестиционной привлекательности проектов. Критерий выбора эффективного варианта государственной поддержки — максимум государственного дохода от реализации программы при обеспечении приемлемой нормы ЧДД для проектов компаний.

На имитационной модели оценки эффективности вариантов межотраслевой инвестиционной программы проигрываются варианты и масштабы потенциального снижения дефицита финансовых ресурсов инвестиционных проектов компаний посредством прямой и косвенной государственной поддержки проектов.

Прямое ресурсное управление предусматривает поддержку участников мегапроекта путем вливания финансовых ресурсов государства. Косвенное регулирование состоит в создании экономических стимулов и нормативно-правовых условий: благоприятного инвестиционного режима для корпоративных участников, льготных условий налогообложения, предоставления инвестиционных кредитов институтами развития, гарантий государства и т. д. Допустимое множество благоприятных режимов реализации инвестиционных проектов участников мегапроекта формируется на основе анализа индикаторов эффективности режимов управления. Предусматривается участие экспертов при определении совокупности форм и мер государственной поддержки.

Координирующий орган на уровне Правительства РФ оценивает достижение целей при различных сценариях мегапроекта: ожидаемые вклады проектов в бюджетные доходы регионов и Федерации, эффективность и границы зоны устойчивости мегапроекта при изменении институциональных условий, согласованность действий федеральных и региональных органов государственной власти, бизнеса и общества. Координирующий орган выявляет проекты компаний в регионах, реализация которых требует изменений институциональных условий, и разрабатывает предложения для Правительства РФ по коррекции системы государственных преференций и направлений нормативно-правового регулирования для формирования благоприятных режимов инвестирования, обеспечивающих устойчивую реализацию мегапроекта.

Предлагаемая организационно-технологическая схема позволит упорядочить технологию стратегического планирования мегапроектов и организацию функционального взаимодействия органов государственного управления и бизнеса при подготовке стратегических документов Правительства РФ, федеральных округов и субъектов Федерации.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> К настоящему времени накоплен значительный опыт решения подобных задач, однако известные нам алгоритмы, как правило, страдают, по крайней мере, одним из двух недостатков: либо они относятся к классу PERT-TIME, т. е. предполагают случай неограниченных ресурсов, либо алгоритмы эти являются эвристическими, т. е. невозможно оценить, достаточно ли близко к оптимальному полученное решение.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Предложен малотрудоемкий полиномиальный алгоритм построения оптимального расписания выполнения работ мегапроекта в условиях ограниченности и складируемости ресурсов при заданных директивных сроках реализации целевых проектов с оценками отклонения приближенного решения от точного. Алгоритм асимптотически точен при произвольных длительностях работ и точен при целочисленных длительностях.



Продолжение таблицы

Уровень управления, координирующий орган, документ стратегического планирования	Методологический под- ход, задачи	Инструментарий	Учет институциональ- ных факторов	Результат	Разра- ботчик
1	2	3	4	5	6
III. Региональный Полномочные представители ФО, администраций субъектов Федерации Стратегии социально- экономического развития ФО, субъектов Федерации	III.1. Системный комплексный народнохозяйственный подход к региональному стратегическому планированию. Задачи: — обеспечение преемственности национальных стратегий на различных уровнях территориальной иерархии с акцентом на институты гражданского общества и бизнес-структуры; — формирование институциональных условий для их реализации	ОМММ в разрезе федеральных округов и субъектов	Эндогенные: формирование институциональ- ных условий для реализации региональных стратегических приоритетов и достижения баланса интере- сов государства и бизнес-структур	Состав и структура типовой стратегии субъекта Федерации, включающая в себя механизмы реализации и контроль институциональных условий	ИЭОПП СО РАН [17]
Администрация субъекта Федерации	III.2. Комплексный подход к построению систем управления инновационным развитием региона: мультипроектное управление и бюджетирование. Задачи: — встраивание программных проектов стратегии регионального развития в современную структуру административного управления; — согласование интересов институциональных участников: администрации субъекта Федерации, менеджмента федеральных целевых программ, бизнес-сообщества, общественных организаций	Когнитивное моделирование результативных систем управления инновационным развитием территориальных образований:  — когнитивная карта;  — матричные свертки целевых показателей проектов;  — сетевые модели распределения бюджетных ресурсов между инновационными проектами региона	Эндогенные: комплексные оценки результативности достижения поставленных целей; региональные приоритеты; варианты условий и мотивации реализации инновационных проектов	СУРР: матричная организационная структура проектного управления в администрациях субъекта федерации и муниципалитетах. Проектный центр управления. Подсистемы управления: — инкубатор для реализации инновационных проектов; — система мотивации креативного процесса; — целевая подготовка инновационных менеджеров и др.	ИПУ РАН [18, 19]
Администрация субъекта Федерации	III.3. Сценарный подход: ситуационный анализ. Задача: разработка управленческих решений для региональных органов управления	Имитационная финансово- экономическая модель развития сырьевого региона	Эндогенные: варианты федеральных и региональных налоговых льгот и преференций для инвестиционных проектов	Рекомендации по изменению федеральной и региональной налоговой политики с целью повышения социальной ценности нефтегазового сектора	ИЭОПП СО РАН [15]

См. далее окончание таблицы



# 4. СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИЕЙ МЕГАПРОЕКТА: КООРДИНАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ИНТЕРЕСОВ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫХ УЧАСТНИКОВ МЕГАПРОЕКТА

Управление процессом реализации мегапроекта предусматривает контроль за выполнением системы долгосрочных инвестиционных соглашений государственных органов управления и компаний, а также мониторинг изменений условий реализации мегапроекта (геополитических факторов, приоритетов государства и компаний и др.), коррекцию государственных мер поддержки.

Решаются следующие управленческие задачи:

- анализ и оценка влияния форм государственного участия и корпоративной политики на стратегию реализации мегапроекта;
- влияние государственных преференций компаниям на эффективность мегапроекта;
- определение направлений государственночастного партнерства.

Учитывая значительную роль государственных органов управления в организации взаимодействия бизнеса и власти при решении стратегических задач планирования и управления мегапроектами, координирующий орган на уровне Правительства РФ необходим как на стадии формирования мегапроекта, так и в течение всего периода его реализации.

Формирование допустимого множества государственных управленческих решений состоит в разработке предложений — стратегических инициатив координирующего органа по изменению административных рычагов федеральных и региональных уровней власти посредством определения государственных приоритетов инвестиционной и инновационной поддержки компаний, принятия дополнительных законов, изменяющих институциональные условия инвестиционной деятельности, а также экономических регуляторов управления мегапроектом.

Координирующий орган управления является своеобразным ситуационным центром согласования стратегических решений институциональных участников мегапроекта, обязательств министерств и ведомств и осуществляет управление инвестиционной программой в соответствии с организационно-технологической схемой, используя модельный инструментарий для проигрывания вариантов государственной поддержки.

На стадии реализации мегапроекта функции государственного координирующего органа состоят в:

- согласовании во времени сроков реализации инвестиционных проектов компаний различных отраслей;
- формировании допустимого множества государственных управленческих решений, обеспечивающих приемлемый для компаний уровень коммерческой эффективности их инвестиционных проектов;
- организации диалога государственных органов власти и бизнеса ключевых компаний по корректировке государственных преференций для повышения эффективности мегапроекта в новых условиях;
- подписании соглашений и контрактов с институциональными участниками и контроль за их исполнением;
- формировании маршрутной карты стратегического управления реализацией мегапроекта;
- организации анализа и согласования стратегических инициатив в исполнительных и законодательных органах власти.

Координация инвестиционной деятельности компаний в мегапроекте основана на использовании двух видов индикаторов управления: индикаторы сбалансированности инвестиционной программы мегапроекта и индикаторы эффективности мер государственной поддержки. Для ресурсного управления используются индикаторы сбалансированности инвестиционных проектов участников по времени и ресурсам, получаемые из сетевой модели. Для оценки мер косвенного регулирования принятия решений частными инвесторами — индикаторы эффективности режимов управления из имитационной модели оценки эффективности вариантов межотраслевой инвестиционной программы.

Предлагаемая нами процедура государственной координации стратегических интересов и инвестиционных намерений государства и компаний направлена на:

- обеспечение межотраслевой сбалансированности во времени реализации взаимосвязанных инфраструктурных и целевых инвестиционных проектов компаний;
- корректировку с помощью имитационной модели институциональных условий для достижения приемлемых показателей коммерческой и экономической эффективности проектов компаний.

Процедура корректировки институциональных условий многошаговая. Сначала анализируется возможность самофинансирования проектов компаний и определяется динамика потребности в заемных средствах. Затем разрабатываются механизмы государственного стимулирования интеграции финансовых ресурсов участников для реали-



Окончание таблицы

Уровень управления, координирующий орган, документ стратегического планирования	инирующий д, документ егического Методологический подход, задачи Инстру		Учет институциональных факторов	Результат	Разра- ботчик
1 2		3	4	5	6
	Организ	зация системы страт	егического управления		
Ситуационные центры на различных уровнях государственного управления	Задача: разработка меха- низма корректи- ровки стратегиче- ских управлен- ческих решений в ходе реализации комплексного мегапроекта	Модели, методы и алгоритмы функционирования систем поддержки принятия управленческих решений и оценки рисков; модульный принцип организации системы на основе экспертных процедур и предпочтений ЛПР	Экзогенные: экспертные варианты институциональных условий в информационных системах оперативного мониторинга, анализа обстановки и оценки ситуаций	Архитектура адаптивной системы поддержки принятия решений, методика ее интеграции в состав ситуационного центра с целью увеличения эффективности управленческих решений. Формирование многовариантных прогнозных оценок развития ситуации с учетом принимаемых решений и сценарных условий	Кубанский технолог. ун-т [16]
Корпоративное управление Программный комплекс «ТЭО-ИНВЕСТ» Программный комплекс	Задачи: разработка биз- нес-планов инвес- тиционных проек- тов предприятий и групп предпри- ятий; разработка финан- сового менеджмен- та для инвестицио- ных проектов  Задача: разработка инвес-	Профессио- нальные системы для финансового анализа и разра- ботки бизнес-пла- нов инвестицион- ных проектов	Экзогенные: экспертные варианты институциональных условий развития промышленных предприятий, кредитной политики банков  Экзогенные: экспертные вариан-	Финансовая и инвестиционная стратегии предприятия или группы предприятий  Консолидирующая программа для	ИПУ РАН [3]
«ТЭО-ИНВЕСТ Холдинг»	тиционной страте- гии холдинга для реализации сово- купности бизнес- планов инвести- ционных проектов участников холдинга	финансового анализа и разработки инвестиционных стратегий холдинга	ты условий и ограничений привлечения внешних инвестиций и консолидации финансовых ресурсов участников холдинга	создания системы стратегического и финансового управления холдинговой компанией	



зации инвестиционной программы мегапроекта в заданные сроки: разрабатываются структура и масштабы государственных преференций для компаний — участников мегапроекта.

На основе показателей коммерческой эффективности проектов компаний формируются два класса проектов:

- низкорентабельные проблемные проекты компаний, испытывающих в течение длительного периода значительный дефицит собственных финансовых ресурсов и потребность в заемном капитале:
- высокорентабельные проекты с коротким сроком дефицита собственных ресурсов, имеющие избыточное положительное сальдо чистой накопленной прибыли.

Нами рассматриваются принципиально различные направления государственной поддержки:

- прямые государственные инвестиции и предоставление налоговых преференций низкорентабельным проектам;
- целевые государственные преференции высокорентабельным проектам для стимулирования консолидации их финансовых ресурсов для финансирования низкорентабельных проектов с целью повышения эффективности реализации мегапроекта в заданные сроки.

В дальнейшем полагаем, что свободные финансовые ресурсы — сальдо чистой накопленной прибыли высокорентабельных проектов — могут быть направлены на инвестирование проблемных проектов программы с целью сокращения их потребностей в заемном капитале, что явится фактором повышения эффективности как проблемных проектов, так и мегапроекта в целом.

На втором этапе анализируются возможные объемы перелива свободных финансовых ресурсов из высокорентабельных проектов в низкорентабельные, оценивается влияние перелива капитала на показатели их коммерческой эффективности и сроки реализации. Для оценки эффективности мер косвенного регулирования используются индикаторы эффективности режимов вариантов государственной поддержки в виде показателей ожидаемого прироста доходности инвестиционных проектов как отклик участников на изменение регуляторов управления (налоговых ставок, таможенных пошлин, банковских процентов и др.). На их основе выявляется зона устойчивости мегапроекта, формируются минимальные и максимальные пороговые значения регуляторов управления, при которых сохраняется целостность и условия обеспечения сбалансированности мегапроекта. Разрабатываются варианты формирования благоприятных условий для реинвестирования относительно свободных финансовых ресурсов в мегапроект.

В результате многошаговых процедур согласования государственных управленческих решений формируется базовая совокупность взаимосвязанных проектов и механизмы государственной поддержки компаниям как эффективная стратегия реализации мегапроекта. Государственные приоритеты, корпоративные и региональные предпочтения эффективной стратегии могут стать основой системы соглашений государственных органов управления и компаний.

Координационный план управления реализацией мегапроекта является документом, обеспечивающим согласованность инвестиционной деятельности институциональных участников по достижению стратегической цели создания мегапроекта в заданные сроки и содержит:

- контракты и соглашения с компаниями, а также перечень мер ответственности за их выполнение;
- схемы взаимодействия участников мегапроекта для решения комплексных межотраслевых проблем;
- государственные обязательства министерств и ведомств;
- рекомендуемые направления государственно-частного партнерства.

Такая структура координационного плана позволяет организовать мониторинг и систему контроля выполнения договоров и соглашений с институциональными участниками мегапроекта.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложенная организационно-технологическая схема стратегического планирования мегапроекта может быть использована в качестве инструментария разработки эффективных стратегий формирования мегапроектов и государственного управления их реализацией, а также согласования стратегических документов Правительства РФ, Федеральных округов, субъектов Федерации и организации мониторинга хода реализации инвестиционных программ мегапроектов.

Разработанный инструментарий апробирован в исследовании реализуемости и согласованности инициативных стратегических проектов Восточной газовой программы ОАО «Газпром» на период до 2030 г. и Государственного плана развития нефте- и газохимии в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия). На основе программноцелевого подхода к разработке системы государственного регулирования предложена комплексная оценка государственных (федеральных и региональных) преференций участникам мегапроекта с учетом эффективности развития и освоенческих



рисков проектов нефтегазохимических кластеров в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия), а также социально-экономического развития регионов Восточной Сибири в интеграции с Дальним Востоком.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- Штыров В.М. Российские мегапроекты. Анализ и управление рисками // Приложение к журналу Время Якутское. 2009. № 1. URL: http://ilin-yakutsk.narod.ru/time\_yak/2009-1/04.htm (дата обращения 28.10.2015).
- Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ «О Стратегическом планировании в Российской Федерации» (принят ГД ФС РФ 20.06.2014). URL: http://graph.document.kremlin.ru/page.aspx?1;3641178 (дата обращения 19.03.2015).
- 3. Васильев С.Н., Цвиркун А.Д. Проблемы управления развитием крупномасштабных систем // Тр. шестой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2012». Москва, 1—3 окт. 2012 г. / ИПУ РАН. Т. 1. С. 10—19. М., 2012.
- Управление развитием крупномасштабных систем. (Современные проблемы. Вып. 2) / Под ред. А.Д. Цвиркуна. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2015. 473 с.
- Долгосрочный прогноз развития экономики России на 2007—2030 гг. (по вариантам). — Москва: ИНП РАН, 2007. — 51 с. — URL: http://www.ecfor.ru/pdf.php?id= forecast/ltf (дата обращения 28.10.2015).
- Кузык Б.Н., Яковец Ю.В. Интегральный макропрогноз инновацонно-технологической и структурной динамики экономики России на период до 2030 г. — М.: Институт экономических стратегий, 2006. — 343 с.
- Кузык Б.Н., Кушлин В.И., Яковец Ю.В. Прогнозирование, стратегическое планирование и национальное программирование. — М.: Экономика, 2011. — 604 с.
- Оптимизация территориальных систем / под ред. С.А. Суспицына. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2010. 620 с.
- Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов / отв. ред. В.В. Кулешов, Н.И. Суслов. — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2014. — 487 с.
- Мелентьев Б.В. Оценка вариантов политики экономического регулирования с помощью межрегионального инструментария «платежи-доходы» // Проблемы прогнозирования. — 2013. — № 6. — С. 102—113.
- 11. Ершов Ю.С., Мельникова Л.В., Малышев Е.А. Теоретические схемы, методические подходы и практика согласования решений в многоуровневых иерархических системах // Структурная и пространственно-временная динамика региональных социально-экономических систем (на примере Уральского и Сибирского федеральных округов) / под общ. ред. В.И. Суслова, О.А. Романовой Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2013. С. 31—146.
- 12. *Макаров В.Л.* К вопросу о проектной экономике // Экономическая наука современной России. 2013. № 3. С. 10—13.
- Крюков В.А., Кулешов В.В., Селиверстов В.Е. Формирование организационно-экономических механизмов ускорения социально-экономического развития Сибири // Реги-

- он: экономика и социология. 2012. № 1. С. 102—122.
- Проектная экономика в условиях инновационного развития: модели, методы, механизмы / отв. ред. Т.С. Новикова. Новосибирск: Параллель, 2013.
- 15. Крюков В.А., Севастьянова А.Е., Шмат В.В. Имитационное моделирование и ситуационный анализ в стратегическом управлении социально-экономическим развитием сырьевого региона // Прогнозирование социально-экономического развития региона / под ред. В.А. Черешнева, А.И. Татаркина, С.Ю. Глазьева / Ин-т экономики УрО РАН, Ин-т иммунологии и физиологии УрО РАН. Екатеринбург, 2011. С. 473—510.
- 16. Черкасов А.Н. Разработка математического и алгоритмического обеспечения адаптивных систем поддержки принятия решений в ситуационных центрах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар, 2011. 39 с.
- Селиверствов В.Е. Региональное стратегическое планирование: от методологии к практике / отв. ред. В.В. Кулешов. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2013. 435 с.
- 18. Бурков В.Н., Буркова И.В., Ириков В.А. Управление инновационным развитием регионов: современный подход // Проблемы теории и практики управления. 2010. № 11. С. 8—12.
- 19. Зубарев В.В., Ириков В.А., Коргин Н.А. Комплексный подход к построению систем управления инновационным развитием региона: проблемы и пути решения // Проблемы управления. 2012. № 1. С. 26—32.
- Ивантер В.В., Кожемяко О.Н., Кувалин Д.Б. Долгосрочное социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Забайкалья: основные проблемы и задачи // Проблемы прогнозирования. 2013. № 4. С. 3—14.
- 21. Власюк Л.И., Минакир П.А. Долгосрочный региональный прогноз: синтез технологического и экономического подходов // Проблемы прогнозирования. 2013. № 2. С. 3—14.
- Йескомб Э. Принципы проектного финансирования. Пер. с англ.: И.В. Васильевская / под ред. Д.А. Рябых. М.: Вершина, 2008. 488 с.
- 23. Пляскина Н.И., Харитонова В.Н. Стратегическое планирование межотраслевых ресурсных мегапроектов: методология и инструментарий // Проблемы прогнозирования. 2013. № 2. С. 15—27.
- 24. О программно-математическом обеспечении задачи ресурсно-календарного планирования Восточно-сибирского нефтегазового комплекса / Э.Х. Гимади, Е.Н. Гончаров, В.В. Залюбовский и др. // Вестник НГУ. Сер.: Математика, механика, информатика. 2010. № 4. С. 51—62.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Цвиркуном.

Пляскина Нина Ильинична — д-р экон. наук, вед. науч. сотрудник, ⊠ pliaskina@hotmail.com,

**Харитонова Виктория Никитична** — канд. экон. наук, вед. науч. сотрудник,  $\bowtie$  kharit@ieie.nsc.ru,

Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, г. Новосибирск, Новосибирский государственный университет.



УДК 334.7:338.32

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ПРЕДПРИЯТИЙ В СОСТАВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР<sup>1</sup>

В.В. Клочков, Н.В. Чернер

Рассмотрена проблема рационального использования и развития производственного потенциала предприятий, входящих в интегрированные структуры (прежде всего, госкорпорации). Предложены методы оценки эффективности управления на уровне интегрированной структуры ресурсами входящих в нее предприятий, в том числе использованием и развитием мощностей отдельных производств.

**Ключевые слова:** интегрированные структуры, производственный потенциал, загрузка мощностей, «узкие места», инвестиции, развитие, эффективность, управление, координация, специализация.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Дефицит производственных мощностей, особенно, современного технологического уровня, становится одной из главных проблем российской высокотехнологичной промышленности, в том числе оборонно-промышленного комплекса (ОПК). В данной работе в качестве основного примера рассматривается авиационная промышленность, хотя изучаемые проблемы и пути их решения представляют интерес и для многих других отраслей. Ограниченность производственных мощностей ОПК становится причиной срыва поставок в рамках государственного оборонного заказа, за что руководство предприятий ОПК и интегрированных структур (объединяющих в настоящее время отрасли или подотрасли — например, самолетостроение, вертолетостроение, двигателестроение и др.) становится объектом критики на высшем уровне. Особую актуальность проблема наращивания производственных мощностей в условиях дефицита времени и инвестиционных ресурсов приобрела в 2014 г. в связи с обострением внешнеполитической обстановки и необходимостью форсированного импортозамещения. Проблема эффективного использования и развития производственных мощностей обостряется и в связи с тем, что подавляющая доля закупок оборудования для технического перевооружения предприятий отрасли в течение ряда лет приходится на импорт, который также может быть ограничен по инициативе стран-лидеров технологического развития. Даже до объявления экономических санкций против России, отечественные предприятия испытывали на международных рынках проблемы с доступом к современным технологиям и производственному оборудованию, особенно в тех случаях, когда оно могло использоваться в производстве продукции оборонного назначения. В этих условиях низкая загрузка производственных мощностей современного технологического уровня, неэффективные (избыточные) инвестиционные программы, тем более, недопустимы, и актуален поиск резервов повышения эффективности использования и развития материально-технической базы предприятий авиационной промышленности.

Интегрированные структуры (ИС), в которые объединено большинство отраслей российского ОПК и их подотраслей, как правило, представляют собой холдинги, в которых консолидированы акции входящих в ИС предприятий. Однако интеграция во многих случаях ограничилась формальной консолидацией собственности. Не во всех холдинговых структурах в полной мере реализовано хотя бы централизованное управление денежными потоками входящих в ИС предприятий, с оперативным их перераспределением. Тем более, практически нигде не внедрено реальное централизованное управление производственными мощностями предприятий. В отсутствие реальной, а не

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 14-18-00519).



формальной интеграции ресурсов, как правило, не наблюдается и ожидаемого синергетического эффекта формирования ИС. Для руководства последних входящие в ИС предприятия выступают, как правило, в качестве «черных ящиков», производственный потенциал которых ненаблюдаем с верхнего уровня управления (ввиду недостаточного уровня информатизации). В этих условиях широко распространен оппортунизм руководства входящих в ИС предприятий — хотя формально они, как правило, утрачивают самостоятельность и являются лишь «производственными площадками».

В настоящей работе предлагаются методы количественной оценки эффективности управления производственным потенциалом предприятий, входящих в интегрированные структуры, а также рекомендации по ее повышению. Традиционно эффективность использования производственных мощностей предприятия определялась, прежде всего, коэффициентом их загрузки [1, 2], однако известно, что существует определенная, экономически обусловленная, избыточность производственных мощностей, позволяющая обеспечить выполнение заказов в нестабильных условиях, минимальное время ожидания выполнения производственных заданий, и др., подробнее см. в работах [3—4]. Поэтому здесь под неэффективностью использования производственных мощностей подразумевается именно их значительная (порядка десятков процентов) перманентная недогрузка на протяжении длительного — порядка года и более — времени, без учета объективно неизбежных краткосрочных колебаний загрузки производственных мощностей. Необходимо определить, какая степень недогрузки производственных мощностей вызвана именно низкой эффективностью управления ресурсами предприятий, входящих в интегрированные структуры.

Основная гипотеза данного исследования состоит в том, что на уровне ИС можно частично восполнять «узкие места» (т. е. обладающие недостаточной мощностью виды производств или переделы) отдельных предприятий благодаря использованию резервов других предприятий, входящих в ИС. Широко известна основанная на выявлении таких «узких мест» управленческая концепция, называемая «Теорией ограничений» (Theory of Constraints, TOC; ее основоположником считается Э. Голдратт, подробнее см., например, в работе [6]). Причем в рамках ТОС рассматриваются не только мощностные ограничения, но также ограничения емкости рынков и др. Кроме того, эта концепция производственного менеджмента фокусируется, строго говоря, даже не на производственных мощностях, а на материальных потоках, т. е. недостаточно лишь обеспечить достаточную

мощность всех звеньев производственной цепочки — необходимо минимизировать вероятность их простоев по причине нехватки производственных заделов. Здесь такие «кратковременные» эффекты не рассматриваются — делается акцент именно на недогрузке производственных мощностей на длительных интервалах порядка года и более.

В то же время, учитывается, что ИС представляет собой не техническую, а организационную систему, и производственные площадки могут иметь интересы, отличные от интересов управляющего «центра» (такие аспекты успешно исследуются в рамках научного направления, называемого теорией активных систем, см., например, книгу [7]). Это может вызывать сокрытие информации о состоянии и использовании их производственного потенциала от руководства ИС. Данная работа и нацелена на выявление таких «скрытых резервов» повышения эффективности использования и развития производственного потенциала ИС на основе доступной «центру» информации.

#### 1. МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ В РАМКАХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР

Рассмотрим интегрированную структуру, в которую входят предприятия (заводы, производственные площадки), обозначаемые индексом i = 1, 2, ..., n. На каждом предприятии внутри интегрированной структуры, в общем случае, может быть представлено несколько видов производств (переделов), обозначаемых индексами j = 1, 2, ..., m. Пока в российской авиационной промышленности преобладают предприятия полного производственного цикла, на большинстве предприятий представлены практически все виды производств, характерных для соответствующих подотраслей заготовительные (литейное, кузнечно-штамповочное и др.), механообработка и другие физико-химические виды обработки деталей (лазерная, электроэрозионная и др.), нанесение покрытий и термообработка, сборочные производства. По мере перехода к матричным и сетевым организационным структурам, характерным для авиационной промышленности передовых в промышленном отношении стран, предусмотрена специализация предприятий, фрагментация производственных цепочек. Однако и в этом случае внутри специализированного предприятия можно будет выделить ряд переделов. Например, механообработка включает в себя несколько видов производств, которые, в общем случае, могут требовать различных видов оборудования, работников различных профессий и др. Далее фрагментировать их, возмож-



но, и нецелесообразно даже в рамках сетевых и матричных организационных структур — но в рамках данной работы реформирование организационной структуры авиационной промышленности и не является предметом интереса. Производственная структура совокупности входящих в ИС предприятий предполагается здесь заданной в описанном виде (производственные площадки i = 1, 2, ..., n, на каждой из которых представлены производства (переделы) j = 1, 2, ..., m). В центре внимания здесь — именно проблемы эффективного использования и развития материально-технической базы описанной совокупности предприятий. В свою очередь, в рамках проводимого здесь анализа несущественно, является ли рассматриваемая ИС формой жесткой интеграции (наподобие холдингов и отраслевых корпораций, созданных к настоящему моменту) или это форма «мягкой» интеграции, добровольного объединения независимых предприятий для реализации определенного проекта, называемая виртуальным производственным объединением (подробнее см. в работе [8]).

Пусть мощность j-го вида производств i-го предприятия составляет  $v_j^i$  машинокомплектов в год. Тогда мощность i-го предприятия  $v^i$  определяется его «узким местом», т. е.

$$v^i = \min_j v^i_j, \quad i = 1, 2, ..., n.$$

В свою очередь, суммарная мощность интегрированной структуры  $V^{\rm UC}$  равна сумме мощностей входящих в нее предприятий:

$$V^{\text{HC}} = \sum_{i=1}^{n} v^{i} = \sum_{i=1}^{n} \min_{j} v_{j}^{i}.$$

В то же время, если на уровне интегрированной структуры осуществляется скоординированное *тактическое управление* (т. е. управление использованием производственного потенциала, подробнее см. в работах [9, 10], в данном случае — мощностей), производственные возможности интегрированной структуры могут существенно превышать определенный выше уровень  $V^{\text{ИС}}$ . «Узкие места» отдельных предприятий можно компенсировать на уровне ИС, задействуя соответствующие свободные мощности других предприятий. В идеальном случае, руководству интегрированной структуры доступна вся суммарная мощность соответствующего вида производств  $v_i$ :

$$v_j = \sum_{i=1}^n v_j^i, \quad j = 1, 2, ..., m.$$

Разумеется, и в этом случае образуются «узкие места», но уже на уровне ИС, и ее максимальные производственные возможности будут определяться суммарной мощностью наиболее «дефицитного» вида производств:

$$\widehat{V}^{\text{MC}} = \min_{j} v_j = \min_{j} \sum_{i=1}^{n} v_j^i.$$

Эта величина заведомо больше (за исключением практически невероятного случая полной сбалансированности мощностей всех видов производств на всех предприятиях, входящих в ИС), чем оцененная выше мощность ИС:

$$\hat{V}^{\text{MC}} = \min_{j} \sum_{i=1}^{n} v_{j}^{i} > \sum_{i=1}^{n} \min_{j} v_{j}^{i} = V^{\text{MC}},$$

так как минимум сумм различных величин больше суммы минимумов.

На практике скоординированное управление производственными мощностями в рамках интегрированных структур почти не реализуется в отечественной авиационной промышленности в силу сложности оценки мощностей конкретных производств на отдельных предприятиях на уровне ИС, высокой трудоемкости оценки производственных мощностей в отсутствие электронной паспортизации предприятий (подробнее см. в работе [11]). Отдельные предприятия могут и не скрывать своих производственных возможностей от руководства ИС, однако при нынешних когнитивных возможностях управления крупными производственными системами, как правило, детальное представление производственных возможностей предприятий, вплоть до мощностей отдельных переделов, на верхних уровнях управления отсутствует. Руководство ИС воспринимает отдельные предприятия как «черные ящики» с известной, сообщаемой руководством этих предприятий, общей мощностью  $v^i$ , i = 1, 2, ..., n. Детализация «узких мест» на уровне ИС возможна лишь при условии кардинальной модернизации системы управления производством в отрасли на базе современных информационных технологий, в том числе корпоративных информационных систем (КИС), ERP (Enterprize Resources Planning — планирование ресурсов предприятия), электронной паспортизации предприятий и инвентаризации основных производственных фондов (ОПФ), позволяющих в режиме реального времени отслеживать наличие, состояние ОПФ, а также фактическую загрузку каждого вида производств на каждом предприятии.

Сами предприятия сообщают руководству ИС, в лучшем случае, агрегированную информацию о своих производственных возможностях в виде



значений их мощностей  $\{v^i\}$ . Если бы в рамках ИС реализовалось централизованное управление использованием производственных возможностей на основе детализированной информации о мощностях и загрузке отдельных производств, переделов, суммарная мощность ИС возросла бы с  $V^{\rm HC}$ до  $\hat{V}^{\mathrm{HC}}$ . Таким образом, отношение  $\hat{V}^{\mathrm{HC}}/V^{\mathrm{HC}}$ показывает, во сколько раз может быть, теоретически, увеличена мощность интегрированной структуры, без дополнительных инвестиций исключительно благодаря совершенствованию тактического управления, т. е. управления использованием производственного потенциала. Разумеется, это теоретический верхний предел производственных возможностей предприятий, входящих в ИС, который на практике вряд ли будет достигнут даже при совершенствовании управления — хотя бы потому, что для достижения этого уровня потребуется перемещать промежуточные продукты между переделами с одних предприятий на другие, что в реальности может оказаться нецелесообразным ввиду конечных затрат на такое перемещение — транспортных, транзакционных и др. Тем не менее, оценить уровень  $\hat{V}^{\text{UC}}$  полезно, чтобы иметь представление о потенциальном выигрыше благодаря повышению эффективности использования производственного потенциала.

Можно ли оценить отношение  $\hat{V}^{\text{ИС}}/V^{\text{ИС}}$  на основе доступной, измеримой информации? Как правило, в рамках относительно редких статистических обследований предприятий (поскольку они, в отсутствие электронной паспортизации предприятий, интегрированных информационных систем, работающих в реальном масштабе времени, довольно трудоемкие и дорогостоящие, [11]), входящих в ИС, оцениваются коэффициенты загрузки их мощностей, причем, иногда и с детализацией до уровня отдельных производств. Обозначим  $k_{j}^{\prime}$  коэффициент загрузки j-го вида производств i-го предприятия, i = 1, 2, ..., n, j = 1, 2, ..., m. Он равен отношению выпуска данного производства  $q_j^i$  к его мощности:  $k_j^i = q_j^i/v_j^i, \, i=1,\,2,\,...,\,n,$ j = 1, 2, ..., m, где выпуск всех производств данного предприятия, если на уровне ИС не используется резерв мощностей отдельных производств, будет одинаков:  $q_i^i \equiv q^i, i = 1, 2, ..., n, j = 1, 2, ..., m$ .

Тогда средний коэффициент загрузки мощностей *j*-го вида производств в наблюдаемой совокупности предприятий (отрасли, подотрасли, ИС)

составит  $\bar{k}_j = q_j/v_j, j=1,2,...,m$ , где  $q_j = \sum_{i=1}^n q_j^i$  — суммарный выпуск j-го вида производств в ИС. Если предприятия данной ИС (подотрасли, отрасли) выпускают финальную продукции, не экспортируя и не импортируя комплектующие изделия и производственные услуги, то выпуски всех видов производств будут одинаковы и просто равны вы-

пуску ИС: 
$$q_1 = q_2 = ... = q_m = q^{\text{ИС}} = \sum_{i=1}^n q^i$$
.

Таким образом средний коэффициент загрузки мощностей j-го вида производств предприятий, входящих в ИС, можно выразить как  $\bar{k}_j = q_j/v_j = q^{\text{ИС}}/v_j, j=1,2,...,m$ . Тогда суммарную мощность j-го вида производств предприятий, входящих в ИС, можно выразить через средний коэффициент загрузки этого вида производств:  $v_j = q^{\text{ИС}}/\bar{k}_j$ , j=1,2,...,m.

Поскольку, как показано выше, потенциально достижимый уровень производственных мощностей ИС лимитируется минимальной по всем видам производств суммарной мощностью, ее можно оценить при известном общем выпуске ИС и средних коэффициентах загрузки мощностей отдельных видов производств по формуле:

$$\hat{V}^{\text{MC}} = \min_{j} v_{j} = q^{\text{MC}} \cdot \min_{j} \frac{1}{\bar{k}_{j}} = \frac{q^{\text{MC}}}{\max_{j} \bar{k}_{j}}.$$

В то же время, предприятия могут сообщать и интегральные коэффициенты загрузки своих мощностей  $\{k^i\}$ , определяемые как отношения их выпусков к их общим мощностям (лимитируемым «узкими местами» конкретных предприятий):  $k^i = q^i/v^i$ , i = 1, 2, ..., n. Тогда суммарный выпуск ИС можно выразить как

$$q^{\text{HC}} = \sum_{i=1}^{n} q^{i} = \sum_{i=1}^{n} k^{i} v^{i}.$$

В отсутствие централизованного управления резервами мощностей отдельных производств, входящих в ИС, суммарная мощность входящих в нее предприятий соответствует выпуску при 100 %-м использовании мощностей отдельных предприятий, т. е.

$$V^{\text{MC}} = \sum_{i=1}^{n} v^{i} = \sum_{i=1}^{n} 1 \cdot v^{i} = q^{\text{MC}} \Big|_{k^{i} = 1, i = 1, ..., n}.$$



Подставляя это выражение в формулу для потенциально достижимой мощности ИС, получим

$$\widehat{V}^{\text{MC}} = \frac{q^{\text{MC}}\Big|_{k^i \equiv 1, \, i = 1, \, \dots, \, n}}{\max_j \left(\overline{k}_j\Big|_{k^i \equiv 1, \, i = 1, \, \dots, \, n}\right)} = \frac{V^{\text{MC}}}{\max_j \left(\overline{k}_j\Big|_{k^i \equiv 1, \, i = 1, \, \dots, \, n}\right)},$$

где  $\left. \overline{k}_{j} \right|_{k^{i} = 1, \; i = 1, \ldots, n}$  — средний коэффициент загруз-

ки *j*-го вида производств предприятий, входящих в ИС, при 100 %-м использовании мощностей отдельных предприятий. Таким образом, при внедрении централизованного управления резервами мощностей отдельных производств, входящих в ИС, суммарная мощность входящих в нее предприятий может возрасти в

$$\frac{\widehat{V}^{\text{MC}}}{V^{\text{MC}}} = \frac{1}{\max_{j} \left(\overline{k}_{j} \Big|_{k_{j}=1, j=1, \dots, n}\right)}$$

раз, т. е. потенциально достижимый относительный прирост мощностей обратно пропорционален максимальному среднему по предприятиям, входящим в ИС, коэффициенту загрузки мощностей отдельных видов производств. Эта величина характеризует эффективность управления использованием производственного потенциала предприятий, входящих в ИС. Чем выше отношение  $\hat{V}^{\text{ИС}}/V^{\text{ИС}}$  и соответственно, чем ниже  $\max_{j}\left(\overline{k}_{j}\right|_{k^{i}=1,\,i=1,\,\dots,\,n}$ , тем выше резервы совершенствования управления.

Исключительно в иллюстративных целях, для демонстрации предлагаемого метода, приведем

расчет на основе данных о производственных мощностях и их загрузке на предприятиях российского авиационного двигателестроения в 2007 г. Использовались данные, указанные самими предприятиями в ежегодных отчетах акционерных обществ и паспортах предприятий. Вначале были рассчитаны уровни загрузки каждого вида оборудования (в свою очередь, эти виды оборудования можно сопоставить определенным производствам, переделам на двигателестроительных предприятиях) на предприятиях подотрасли в 2007 г. Обобщение результатов показало, что в 2007 г. средняя загрузка оборудования на предприятиях российского авиационного двигателестроения лежала в диапазонах, представленных в таблице.

Наивысшая загрузка наблюдалась по измерительному оборудованию (65 %), гальваническому (58 %), оборудованию для термообработки (53 %). Таким образом, при идеальном управлении резервами мощностей отдельных производств на предприятиях в составе ИС удалось бы повысить выпуск в 1/0,65 раз, т. е. на 54 %. По мере устранения «узких мест» на уровне ИС (конкретнее — после повышения мощности измерительного оборудования), удалось бы повысить суммарную мощность ИС в 1/0,58 раз (относительно начального уровня), т. е. на 72 %, затем в 1/0,53 раз, т. е. на 89 % (после повышения мощности гальванического производства), и т. п.

Пользуясь предложенным здесь инструментарием и основываясь на современных исходных данных, можно самостоятельно оценить эффективность использования производственного потенциала предприятий, входящих в состав интег-

### Диапазоны значений средней загрузки различных видов оборудования на предприятиях авиационного двигателестроения в 2007 г., %

Рид оборудоромия		Вид предприятий	
Вид оборудования	Серийные заводы	Разработчики	Агрегатные заводы
Металлорежущее	33,9—62,0	40,0—100,0	42,0—90,0
Кузнечно-прессовое	34,1—40,0	15,0—50,0	25,0—74,0
Литейное	34,3—86,0	60,0	28,0—50,0
Сварочное	34,2—54,0	30,0—90,0	10,0—56,0
Сборочно-монтажное	50,0	40,0—76,0	30,0—50,0
Для обработки неметаллов	33,6	50,0	30,0—62,0
Для термообработки	33,9—95,0	60,0—90,0	42,0—80,0
Гальваническое	33,8—90,0	65,0	40,0—94,0
Измерительное	80,0—93,0	50,0—90,0	43,0—88,0
Экспериментально-стендовое	15,0	30,0—50,0	25,0—92,0
Прочие	80,0—90,0	30,0	32,0—60,0



рированных структур, в различных отраслях высокотехнологичной промышленности.

#### 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ В РАМКАХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР

В том случае, если располагаемая мощность предприятия или интегрированной структуры недостаточна для выполнения производственных программ, в рамках стратегического управления можно предпринять расширение производственных мощностей, что потребует соответствующих инвестиций. Их эффективность можно оценить по их влиянию на уровень производственных мошностей.

Как уже было показано, в принципе мощность интегрированной структуры может быть увеличена в  $\hat{V}^{\rm HC}/V^{\rm HC}$  раз без инвестиций в ОПФ, т. е. без закупки оборудования, строительства новых зданий и сооружений, и т. п. — исключительно путем совершенствования управления ресурсами предприятий, входящих в ИС. Разумеется, это также требует инвестиций — главным образом, в информационные системы управленческого назначения, позволяющие реализовать маневр мощностями отдельных производственных площадок в реальном масштабе времени. В то же время, в отсутствие централизованного управления ресурсами предприятий, входящих в интегрированные структуры, увеличение мощностей (которое в настоящее время актуально для авиационной промышленности как в военном, так и в гражданском сегментах) даже относительно уровня  $V^{\rm UC}$  потребует инвестиций. Их потребный объем зависит от конкретных принципов планирования развития производственного потенциала. Они могут отличаться степенью рациональности — даже при отсутствии рассмотренного выше централизованного управления ресурсами предприятий.

Руководство самих предприятий, предъявляя руководству ИС агрегированный уровень своих производственных мощностей  $\{v^i\}$ ,  $i=1,\,2,\,...,\,n$ , как правило, знает «узкие места» своего предприятия. И если на уровне ИС принимается решение об увеличении производственной мощности i-го предприятия до уровня  $v^{i'}=v^i+\Delta v^i$ , можно спланировать развитие производственного потенциала предприятия наиболее экономным образом, в первую очередь, ликвидируя именно «узкие места». Минимально необходимый для запланированного

увеличения мощностей объем инвестиций для i-го предприятия можно представить в виде:

$$\Delta \breve{I}^{i}(\Delta v^{i}) = \sum_{i=1}^{m} b_{j}^{i} \max\{0; (v^{i'} - v_{j}^{i})\}, \quad i = 1, 2, ..., n,$$

где  $b_j^i$  — фондоемкость j-го вида производств на i-м предприятии (строго говоря, фондоемкости могут отличаться на разных предприятиях — хотя бы в силу индивидуальных условий капитального строительства в различных регионах, а также различных технологий, которые целесообразно применять в зависимости от объемов производства на конкретном производственном объекте). В качестве интегрального показателя эффективности развития материально-технической базы предприятий, можно оценить среднюю фондоемкость каждого предприятия при повышении его мощности на заданную величину  $\Delta v^{i\,1}$ :

$$\bar{b}^{i}(\Delta v^{i}) = \frac{\Delta I^{i}(\Delta v^{i})}{\Delta v^{i}}, \quad i = 1, 2, ..., n.$$

Однако запрашиваемый объем инвестиций  $\Delta I^i(\Delta v^i)$  далеко не всегда будет соответствовать ранее вычисленному минимально возможному значению  $\Delta \check{I}^i(\Delta v^i)$ . Например<sup>2</sup>, руководство предприятий может запрашивать инвестиции таким образом, чтобы пропорционально повысить мощности всех производств на  $\Delta v^i$ , тогда

$$\Delta I^{i}(\Delta v^{i}) = \Delta v^{i} \sum_{j=1}^{m} b_{j}^{i}, \quad i = 1, 2, ..., n,$$

и средняя фондоемкость і-го предприятия составит

$$\bar{b}^{i}(\Delta v^{i}) = \frac{\Delta I^{i}(\Delta v^{i})}{\Delta v^{i}} = \sum_{j=1}^{m} b_{j}^{i}, \quad i = 1, 2, ..., n,$$

т. е. сумму фондоемкостей отдельных производств в составе данного предприятия. Эту величину можно считать средней фондоемкостью при сбалансированном, т. е. пропорциональном развитии мощностей всех видов производств. И даже при оптимальном планировании развития материально-технической базы средняя фондоемкость предприятия достигнет этой величины после ликвидации всех «узких мест» и выравнивания мощностей

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Разумеется, здесь имеет значение не только прирост мощностей  $\Delta v^i$ , но и их изначальный уровень  $v^i$ .

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Исчерпывающий перечень нерациональных, всей ИС, стратегий развития отдельных предприятий, вряд ли возможно составить, поэтому ограничимся одним простым примером таких стратегий.



всех производств. Однако до того, при рациональном планировании инвестиций, средняя фондоемкость должна быть ниже, поскольку не все производства на предприятии одновременно нуждаются в расширении. При наличии сильно выраженных «узких мест» различие между описанными суммами инвестиций может быть многократным.

На уровне интегрированных структур можно ставить оптимизационные задачи распределения инвестиций вила:

$$\Delta I^{\text{MC}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta I^{i}(\Delta v^{i}) \rightarrow \min_{\{\Delta v^{i}\}} \left| \sum_{i=1}^{n} \Delta v^{i} = \Delta V^{\text{MC}}, \quad (1) \right|$$

т. е. планируемый суммарный прирост мощности ИС должен быть достигнут, по возможности, с минимальными инвестиционными затратами. Строго говоря, в авиационной промышленности сумма инвестиций в развитие производственного потенциала предприятий не может быть обобщающим критерием принятия решений, хотя бы потому, что, помимо инвестиций в основные фонды, в структуре себестоимости продукции присутствуют и более весомые составляющие — фонд оплаты труда, материальные затраты. И вполне возможно, что вариант развития производственных мощностей, требующий минимальных инвестиций, не будет эффективен даже по критерию минимизации суммарных издержек (хотя в наукоемкой промышленности, в том числе авиационной, и минимум затрат не является корректной целью при принятии решений, подробнее см. в работе [12] — важны также факторы времени выхода продукции на рынок и обеспечения ее качества). Большие инвестиционные издержки могут быть компенсированы меньшим уровнем средних переменных затрат на стадии производства — путем снижения трудоемкости и материалоемкости производственных процессов. В то же время, потребная сумма инвестиций может быть критически важным показателем в условиях дефицита инвестиционных ресурсов как денежных, так и материальных, так как иногда возможности закупки необходимого оборудования ограничены по причинам осложнения внешнеполитической обстановки и удешевления рубля относительно иностранных валют (при импорте) либо по причине ограниченных возможностей российского станкостроения.

Как показано выше, средняя фондоемкость предприятий авиационной промышленности  $\bar{b}^i$ , по мере наращивания их мощностей, должна вести себя следующим образом: сначала, до полного устранения всех «узких мест», она должна быть ниже суммы фондоемкостей отдельных произ-

водств  $\sum_{j=1}^{m} b_{j}^{i}$ , а затем, постепенно повышаясь

(поскольку устранение «узких мест» выгоднее начинать с наиболее «дешевых»), сравняться с этой суммой, когда будет достигнута сбалансированность мощностей всех видов производств на предприятии:

$$\forall i = 1, 2, ..., n$$
:

$$\begin{cases} \bar{b}^{i}(\Delta v^{i}) < \sum_{j=1}^{m} b_{j}^{i}, & \exists j : v_{j}^{i} > v^{i}, \\ \bar{b}^{i}(\Delta v^{i}) = \sum_{j=1}^{m} b_{j}^{i}, & v_{1}^{i} = v_{2}^{i} = \dots = v_{m}^{i} = v^{i}. \end{cases}$$

Превышение средней фондоемкостью предприятия уровня  $\sum\limits_{j=1}^m b^i_j$  свидетельствует о непро-

порциональном развитии отдельных видов производств, не приводящем к росту производственных возможностей предприятия в целом. В терминах теории сетевого планирования, лежащей в основе научных методов оперативного управления производством [13, 14], развиваемые производства не лежат на критическом пути для данного предприятия, т. е. не они лимитируют время выполнения производственных заданий и, в конечном счете, производственные возможности предприятия. По каким причинам может осуществляться такое нерациональное, с позиций интегрированной структуры в целом, развитие производственного потенциала отдельных предприятий?

Завышение руководством предприятий в рамках ИС потребных объемов инвестиций для расширения производственных возможностей может свидетельствовать как о неэффективном управлении развитием производственного потенциала внутри предприятия (по причинам ограниченной рациональности, дефицита информации и когнитивных возможностей ее использования аналогично тому, что рассматривалось выше применительно к интегрированным структурам), так и о сознательном оппортунистическом поведении. В принципе, в данной ситуации действенным средством против оппортунизма может стать конкурсный механизм распределения инвестиций в рамках ИС. Ему и соответствует приведенная выше постановка оптимизационной задачи (1). Ее решение сводится к выбору в качестве получателей инвестиционных ресурсов таких предприятий, которые обеспечат заданный прирост мощности с наименьшими инвестициями. В свою очередь, это означает первоочередную ликвидацию самых «дешевых» «узких мест». Кроме того, такой конкурс-



ный механизм способствует большей сбалансированности мощностей отдельных производств на предприятиях.

В то же время, в рамках реализуемой в настоящее время концепции реструктуризации авиационной промышленности [15], скорее, следует стремиться не к выравниванию мощностей всех производств на предприятиях с сохранением на каждом из них полного цикла производства, а, напротив, к специализации предприятий (которая, естественно, представляет собой сугубо непропорциональное развитие мощностей отдельных переделов). Но эффективная специализация производственных плошадок в рамках интегрированных структур также требует централизованного планирования на уровне ИС, что и является, как показано выше, основным средством повышения эффективности использования производственного потенциала предприятий российской авиационной промышленности на нынешнем этапе ее развития. И в этом случае также можно поставить задачу оптимального выбора специализации предприятий в рамках ИС. Важными факторами, влияющими на выбор, служат уровни уже созданных производственных мощностей конкретных переделов, а также приростные фондоемкости соответствующих видов производств на различных предприятиях. Наличие на предприятии значительных мощностей (причем современного технологического уровня) данного вида производств и низкие значения приростной фондоемкости способствуют выбору этого предприятия в качестве или центра специализации или центра технологической компетенции (в зависимости от вида специализации предметная или технологическая [1]), специализирующегося в рамках ИС на выпуске соответствующих комплектующих изделий или производственных услуг. Впрочем, и в данном случае для обоснования решений некорректно ограничиваться лишь сравнением инвестиционных затрат. Следует сравнивать интегральные показатели эффективности инвестиционных проектов развития материально-технической базы предприятий — с учетом полных издержек производства, а также изменения доходов, определяемого качеством продукции и временем ее выхода на рынок.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Эффективность использования производственного потенциала предприятий авиационной промышленности, объединенных в интегрированные структуры, зависит от возможности централизованного управления на уровне интегрированной структуры ресурсами входящих

в нее предприятий, в том числе использованием мощностей отдельных производств. При появлении такой возможности благодаря электронной паспортизации предприятий авиационной промышленности и наличию информационных систем (КИС, ERP, MRP и MRPII-систем), позволяющих в реальном масштабе времени контролировать наличие, исправность и фактическую загрузку мощностей отдельных производств на всех предприятиях, относительный прирост суммарных мощностей интегрированной структуры может достигнуть величины, обратной по отношению к среднему коэффициенту загрузки оборудования самого загруженного в данной интегрированной структуре вида производств. Как показывают расчеты на примере предприятий российского авиационного двигателестроения, в 2008 г. можно было достичь повышения суммарной производственной мощности подотрасли на 40-60 % без инвестиций в строительство и закупку нового производственного оборудования.

Эффективность управления развитием материально-технической базы предприятий авиационной промышленности можно оценить с помощью среднего по предприятию коэффициента приростной фондоемкости, равного отношению объема инвестиций к соответствующему приросту уровня производственных мощностей. При наличии на предприятии ярко выраженных «узких мест» коэффициент приростной фондоемкости может быть в несколько раз ниже значения, соответствующего сбалансированному пропорциональному развитию всех видов производств на предприятии (и равного сумме фондоемкостей всех видов производств на предприятии). По мере повышения сбалансированности мощностей отдельных производств, коэффициент приростной фондоемкости возрастает до указанного выше значения. Превышение этого уровня коэффициентом приростной фондоемкости свидетельствует о непропорциональном развитии мощностей на данном предприятии.

В рамках интегрированной структуры можно поставить задачу оптимального распределения инвестиций между предприятиями, которая имеет следующие решения:

- при сохранении на каждом предприятии исходного набора производств, преимущественно следует выделять инвестиционные ресурсы тем предприятиям, у которых коэффициент приростной фондоемкости наименьший, т. е. устранение «узких мест» наименее затратно;
- если же на уровне интегрированной структуры существует возможность управления внутрен-



ней производственной структурой предприятий, целесообразна их специализация на тех видах про-изводств, для которых суммарная себестоимость продукции будет наименьшей при размещении на данном предприятии.

В то же время, информатизация управления производством, централизованное планирование использования и развития материальнотехнической базы предприятий на уровне интегрированных структур требуют значительных затрат. Эти затраты следует соотносить с полученными с помощью предложенных в данной работе методов оценками выигрыша от повышения эффективности управления производственным потенциалом. На основе такого сравнения можно принимать обоснованные решения о внедрении информационных систем мониторинга производственного потенциала предприятий, а также о внедрении централизованного управления ресурсами предприятий в составе ИС.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Волков О.И., Девяткин О.В.* Организация производства на предприятии (фирме). М.: ИНФРА-М, 2004. 448 с.
- 2. *Кантор Е.Л., Гинзбург А.И., Кантор В.Е.* Основные фонды промышленных предприятий: учебное пособие. СПб.: Питер 2002 229 с
- Питер, 2002. 229 с.

  3. *Клочков В.В.*, *Чернышова Н.Н.* Эффективное управление использованием и развитием производственного потенциала авиастроительных предприятий в нестабильных условиях // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2012. № 45 (135). С. 10—21.
- Suri R. Quick response manufacturing: a companywide approach to reducing lead times. — N.-Y.: Productive Press, 1998.

- 5. *Suri R*. It's about time: the competitive advantage of quick response manufacturing. N.-Y.: Productive Press, 2010.
- 6. Голдрат Э.М., Кокс Дж. Цель. Процесс непрерывного совершенствования. Минск: Попурри, 2009. 496 с.
- 7. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: СИНТЕГ, 1999.
- 8. *Клочков В.В.* CALS-технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 124 с.
- Клейнер Г.Б. Стратегия предприятия. М.: Дело, 2008. 568 с
- Тренев Н.Н. Стратегическое управление. М.: Приор, 2000. — 288 с.
- 11. *Мантуров Д.В., Клочков В.В.* Система прогнозирования и обеспечения реализуемости производственных программ авиационной промышленности // Вестник МАИ. 2012. Т. 19, № 1. С. 163—172.
- 12. *Клочков В.В.*, *Циклис Б.Е*. Минимизация затрат и управление развитием наукоемкой промышленности (на примере авиастроения) // Контроллинг. 2011. № 1 (37). С. 8—17.
- 13. *Стивенсон В.Дж.* Управление производством. М.: Бином, 2002. 928 с.
- Таха X. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2001. 912 с.
- 15. Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013—2025 годы». URL: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Vizualizatsiya\_GP\_RAP\_140507.pdf (дата обращения 24.10.2010).

Статья представлена к публикации руководителем РРС В.Ю. Столбовым.

Клочков Владислав Валерьевич — д-р экон. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 

☑ vlad klochkov@mail.ru,

Чернер Наталья Владимировна — канд. экон. наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 

☑ natalya.cherner@yahoo.com.



**Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б., Чернов И.В. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством** / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б. Шелков, И.В. Чернов; Центр исслед. проблем безопасности РАН. — М.: Наука, 2015. — 542 с. — ISBN 978-5-02-039196-3.

В монографии рассмотрен широкий круг теоретических и прикладных проблем повышения эффективности информационного управления в условиях глобализации. Приведены результаты анализа процессов геополитического комплексного информационного противоборства в условиях роста международной напряженности. Рассмотрены проблемы противодействия информационной агрессии, основанной на манипулятивных технологиях.

Изложена методология комплексного сценарного анализа и моделирования информационных, политических и социально-экономических процессов. Рассмотрены формализованные методы описания и анализа стратегий информационного воздействия и моделирования угроз в рамках геополитического информационного противостояния.

Приведены результаты разработки и исследования комплекса моделей анализа эффективности процессов управления информационной, социальной, региональной и техногенной безопасностью с использованием аппарата функциональных знаковых графов.

Для научных работников и специалистов в области организационного и информационного управления, а также студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 621.0:004.02

# МЕТОД РАСЧЕТА ГАРАНТИРОВАННОГО ВРЕМЕНИ МОДИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

#### А.А. Байбулатов

Предложен метод расчета гарантированного (максимального) времени модификации программного обеспечения с длительным итерационным процессом разработки на основе аппарата «Network calculus». Выполнены расчеты максимального времени модификации программного обеспечения АСУТП АЭС на этапах пуско-наладки и эксплуатации для различных способов модификации.

Ключевые слова: время модификации, программное обеспечение, «Network calculus», АЭС.

#### ВВЕДЕНИЕ

При разработке и сопровождении программного обеспечения (ПО) нередко возникает задача предварительной оценки временных затрат на его разработку [1]. Особый интерес представляет не полное время разработки проекта (которое определяется заказчиком и разработчиком на основе их квалификации и опытных данных и фиксируется в соответствующих документах на начальном этапе жизненного цикла ПО), а время разработки промежуточных работоспособных версий, т. е. время модификации. Решение этой задачи необходимо для планирования сроков разработки (модификации), а также для привлечения необходимого количества трудовых ресурсов. Особенно актуальна эта задача для промышленных систем с высоким экономическим риском в случае простоя и объектов повышенного риска эксплуатации. В настоящее время имеется ряд моделей и методов для прогнозирования временных затрат на разработку (модификацию) ПО.

Структурно-логическая модель прогнозирования времени разработки ПО [2] дает наглядное представление «сверху — вниз» на качественном уровне, но для получения с ее помощью количественных оценок необходимы экспертные данные [3], которые не всегда можно считать корректными [1]. Технология нечеткого прогнозирования [4] основана на методе нечеткого логического вывода. Отдельно можно выделить методы оценки, основанные на аналогии [5], которые работают совместно с нечеткой логикой, генетическими алго-

ритмами и др. Однако все перечисленные методы не учитывают итерационный характер разработки ПО, которого придерживается большинство современных разработчиков, а ориентированы, в основном, на «водопадную» модель [6].

Для оценки характеристик итерационного процесса разработки ПО — временных затрат на одну итерацию разработки или версию ПО необходимы другие методы. В большинстве случаев для решения подобных задач применяется классическая теория массового обслуживания [7]. В некоторых случаях применяются также ее более современные развитые формы. Например, многофазные системы массового обслуживания [8], которые состоят из нескольких типовых узлов, расположенных последовательно, т. е. представляют собой совокупность нескольких систем массового обслуживания. Тем не менее, любая самая сложная модель теории массового обслуживания работает с понятиями теории вероятностей и может предсказать только статистически среднее значение определяемой величины. Но известно, что статистическими характеристиками трудно воспользоваться: для дальнейших расчетов и планов, как правило, нужны характеристики детерминированные. Кроме того, средние статистические характеристики совершенно не подходят для промышленных систем с высоким экономическим риском в случае простоя и объектов повышенного риска эксплуатации, где наибольший интерес представляют наихудшие значения прогнозируемых величин. При оценке временных затрат для таких систем необходимо предсказать не среднее время разработки, а гарантированное (максимальное).



Предлагаемый метод на основе аппарата «Network calculus» позволяет достаточно легко решить задачу оценки максимального времени разработки версии ПО (модификации ПО).

В работе исследована применимость аппарата «Network calculus» для расчета максимального времени модификации программного обеспечения АСУТП АЭС разработки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН [9] версии для АЭС «Куданкулам» (Индия). Оценка максимального времени модификации ПО представляет собой важную задачу, поскольку сроки модификации могут быть жестко ограничены временем планово-предупредительного ремонта или внепланового останова энергоблока АЭС. Под ПО в работе понимается его часть в виде информационной базы сигналов и графических мнемосхем.

# 1. ЗАДАЧА РАСЧЕТА ГАРАНТИРОВАННОГО ВРЕМЕНИ МОДИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

#### 1.1. Annapat «Network Calculus»

«Network calculus» [10] — метод анализа детерминированных систем с очередью, который применяется для расчета характеристик вычислительных сетей [11—13] и оперирует понятиями мини-плюс алгебры [14]. Основы метода заложены в конце прошлого века [15—18].

Аппарат метода «Network calculus» может быть также применен для решения задачи расчета гарантированного (максимального) времени разработки версии ПО или модификации ПО. Проводя аналогию с вычислительными сетями, может быть оценена «задержка» разработки, т. е. время обработки одного пакета заданий при заданном потоке.

Задача может быть поставлена следующим образом. Задания на разработку (модификацию) ПО имеют вид потока. Разработка (модификация) ПО имеет итерационной характер. Необходимо оценить максимальное время, за которое может быть проведена модификация ПО. Особенность задачи состоит в том, что необходимо оценить не полное время разработки ПО, а время модификации, которое, как правило, соответствует одной итерации разработки с учетом очереди входного потока.

Для решения этой задачи потребуются некоторые понятия аппарата «Network calculus».

 $\Phi$ ункция потока F(t) — неотрицательная неубывающая функция времени.

Огибающая потока  $\alpha(t)$  — возрастающая функция, ограничивающая функцию потока (рис. 1).

Доказано [10], что:

$$\alpha(t) = \sup_{\tau \ge 0} \{ F(t+\tau) - F(\tau) \}. \tag{1}$$

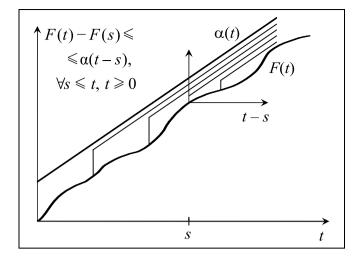


Рис. 1. Функция потока и его огибающая

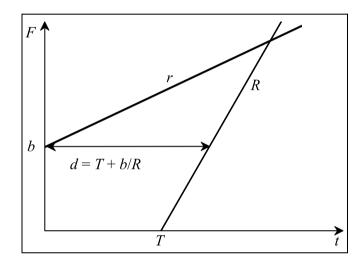


Рис. 2. Максимальное время модификации для однокомпонентной модели

Функция обслуживания:

$$\beta(t) = R(t - T), \quad t > T,$$
  
$$\beta(t) = 0, \quad t \le T,$$

где R — скорость обслуживания, T — задержка обслуживания.

Рассмотрим две модели метода «Network Calculus», отличающиеся описанием входного потока.

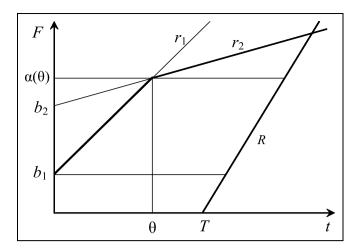
**Однокомпонентная модель.** Огибающая входного потока имеет вид  $\alpha(t) = rt + b$ , где r — скорость, b — максимальный размер пакета.

Максимальное время модификации [10] (рис. 2):

$$d = b/R + T, \quad r \le R. \tag{2}$$

Двухкомпонентная модель IntServ. Огибающая входного потока имеет вид  $\alpha(t) = \min(r_1 t + b_1, r_2 t + b_2)$ , где  $r_1$  и  $b_1$ ,  $r_2$  и  $b_2$  — скорость и макси-





Puc. 3. Максимальное время модификации для двухкомпонентной модели IntServ

мальный размер пакета для первой и второй компонент соответственно.

Условие применимости двухкомпонентной модели IntServ:  $b_1 < b_2, r_1 > r_2$ .

Максимальное время модификации [10] (рис. 3):

$$d = \max(\alpha(\theta)/R + T - \theta, b_1/R + T), \tag{3}$$

где 
$$\theta = \frac{b_2 - b_1}{r_1 - r_2}$$
.

Для расчета максимального времени модификации ПО с помощью аппарата «Network calculus» необходимы характеристики входного потока (скорость и максимальный размер пакета или огибающая) и функции обслуживания (разработки ПО).

Очевидно, что условием применимости аппарата «Network calculus» является итерационный характер процесса разработки: задания на разработку должны описываться потоком. При этом скорость обслуживания (разработки) должна превышать скорость входного потока (потока заданий).

#### 1.2. Алгоритм решения

Схема обобщенного алгоритма расчета максимального времени модификации ПО приведена на рис. 4. Рассмотрим его более подробно.

*Шаг 1. Выбор модели (одно- или двухкомпонентной).* При выборе модели можно руководствоваться:

- видом входного потока (если он известен),
- типом модификации ПО.

Нередко внешний вид входного потока в графическом кумулятивном представлении за некоторый промежуток времени из прошлого может помочь выбрать модель. В некоторых случаях легко определяется «точка перегиба», которая разделяет поток на две компоненты (см. далее рис. 6).

Модификацию ПО, в зависимости от причин, можно разделить на два типа: устранение ошибок и добавление новых функциональных возможностей, ввод новых модулей, подсистем и т. п. В случае, если присутствует модификация (и соответственно входной поток) только одного типа, модель можно выбрать однокомпонентную; при наличии обоих типов модификации (и входных потоков) лучше подойдет модель двухкомпонентная.

Если рассмотреть жизненный цикл промышленной системы, для которой разрабатывается и модифицируется ПО, то можно отметить, что на этапе пуско-наладки присутствуют оба типа модификации, поэтому в этом случае имеет смысл воспользоваться двухкомпонентной моделью; на этапе эксплуатации, как правило, модификация определяется только устранением ошибок, поэтому подойдет однокомпонентная модель.

Шаг 2. Определение характеристик входного потока. Аппарат «Network calculus» не накладывает никаких ограничений на входной поток — поток может иметь произвольные характеристики. Однако применение данного аппарата нецелесообразно в двух случаях: при сильно разреженном входном потоке, когда результат очевиден; при нестабильном входном потоке. Применение «Network calculus» оправдано в случае потока со стабильными характеристиками. При модификации, связанной с устранением ошибок, входной поток определяется оставшимися в ПО ошибками, которые, как известно, хорошо описываются моделями, в которых экспоненциальная зависимость количества ошибок от времени на длительных временных интервалах переходит в константу [19] и соответственно стабилизирует входной поток. Применять «Network calculus» желательно именно на этих временных интервалах.

Если входной поток за некоторый промежуток времени из прошлого известен, то характеристики потока можно определить на основе этого временного промежутка. Если входной поток за прошедшее время неизвестен, то характеристики потока можно установить экспертным путем. Например, максимальный размер пакета заданий на разработку можно принять равным максимальному размеру проекта ПО.



Рис. 4. Обобщенный алгоритм расчета максимального времени модификации ПО



Шаг 3. Вывод функций обслуживания. Функции обслуживания всегда можно найти экспериментальным путем посредством исследования зависимости времени разработки ПО от объема заданий на разработку.

*Шаг 4. Численные расчеты*. После определения характеристик входного потока и функций обслуживания нетрудно провести численные расчеты по формуле (2) для однокомпонентной модели и по формуле (3) — для двухкомпонентной.

## 2. РАСЧЕТ ГАРАНТИРОВАННОГО ВРЕМЕНИ МОДИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

#### 2.1. Постановка задачи

Применим (исследуем применимость) изложенный метод на основе аппарата «Network calculus» для расчета гарантированного (максимального) времени модификации программного обеспечения АСУТП первого энергоблока АЭС «Куданкулам» (Индия).

Задачу можно поставить следующим образом. Пусть модификация ПО осуществляется одним проектировщиком после получения каждого пакета заданий; поток заданий на модификацию за прошедшее время известен. Необходимо оценить максимальное время, за которое может быть проведена модификация ПО одним проектировщиком в будущем.

#### 2.2. Анализ входного потока

Рассмотрим поток заданий на мнемосхемы в жизненном цикле АСУТП АЭС (график потока приведен на рис. 5, его характеристики — в табл. 1).

Для потока на этапе эксплуатации будем пользоваться однокомпонентной моделью, а на этапе пуско-наладки — двухкомпонентной.

Для нахождения параметров двухкомпонентной модели преобразуем поток заданий на мнемосхемы на этапе пуско-наладки к виду с нарастающей суммой (кумулятивному виду) (рис. 6).

Приведем временную шкалу к равномерной сетке и сделаем пересчет на рабочие дни. Выполним аппроксимацию потока методом наименьших квадратов линейными функциями. По формуле (1) численными методами найдем огибающую потока

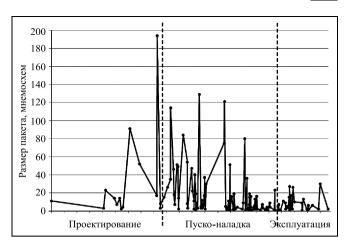


Рис. 5. Поток заданий на мнемосхемы в жизненном цикле АСУТП АЭС

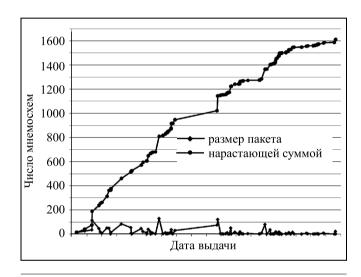


Рис. 6. Поток заданий на мнемосхемы на этапе пуско-наладки (пакетный вид и вид с нарастающей суммой)

и также аппроксимируем ее линейными функциями (рис. 7):

$$N_1 = 3.13t + 90, \quad N_2 = 1.65t + 530.$$
 (4)

Для этапа эксплуатации (однокомпонентной модели) огибающую потока искать не будем, а вос-

Таблица 1

#### Продолжи-Средний Среднеквад-Максимальный Число Число Этап тельность, размер пакета, ратическое размер пакета. пакетов пакетов/раб. день раб. дней мнемосхем отклонение мнемосхем 194 751 0,0186 Проектирование 31,64 52,69 14 782 15,49 0,1330 129 Пуско-наладка 25,37 104 348 0,0977 7,24 7,77 34 27 Эксплуатация

Характеристики потока заданий на мнемосхемы в жизненном цикле АСУТП АЭС



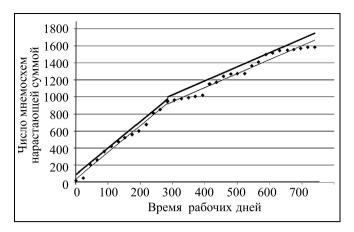


Рис. 7. Поток заданий на мнемосхемы на этапе пуско-наладки ACУТП АЭС (нарастающей суммой с приведением временной шкалы к равномерной сетке и пересчетом на рабочие дни): тонкие линии — аппроксимированный поток мнемосхем, жирные линии — аппроксимированная огибающая потока

пользуемся экспериментально полученными характеристиками (см. табл. 1): максимальный размер пакета b=27, скорость найдем по формуле

(средний размер пакета) · (число пакетов/раб. день):

$$r = 7.24 \cdot 0.0977 = 0.71$$
.

#### 2.3. Вывод функций обслуживания

Функции обслуживания найдем экспериментальным путем. Для этого рассмотрим цикл разработки (модификации) ПО (рис. 8): получение задания на разработку (модификацию), разработка (модификация), тестирование, поставка. Будем считать, что тестирование проходит успешно и никаких коррекций вносить не требуется.

Определим несколько способов разработки (модификации) ПО (далее в тексте указаны подстрочными индексами):

*auto* — модификация с автоматическим созданием базы сигналов, без изменения мнемосхем в графическом редакторе;

*auto*, *edit* — модификация с автоматическим созданием базы сигналов и с изменением мнемосхем в графическом редакторе;

DB — модификация с автоматизированным («ручным») созданием базы сигналов, без изменения мнемосхем в графическом редакторе;

*DB*, *edit* — модификация с автоматизированным («ручным») созданием базы сигналов и с изменением мнемосхем в графическом редакторе.

Для этапа пуско-наладки рассмотрим только способы разработки без изменения мнемосхем, поскольку в этом случае эскизы мнемосхем приходят в заданиях в готовом виде и не нуждаются в

корректировках. Для этапа эксплуатации рассмотрим все вышеперечисленные способы разработки.

За единицу изменений примем 1 мнемосхему и найдем экспериментальную зависимость времени модификации ПО одним проектировщиком от числа мнемосхем. Будем считать, что время модификации включает в себя интервалы (состав зависит от способа разработки): время подготовки, время модификации мнемосхем в графическом редакторе, время работы с мнемосхемами в автоматизированной программе, время работы с базой сигналов в автоматизированной программе, время выполнения автоматических процедур создания базы сигналов, время выполнения автоматической процедуры объединения, время подготовки к тестированию, время тестирования, время поставки. В табл. 2 и 3 приведены усредненные времена (t) модификации программного обеспечения АСУТП АЭС в зависимости от числа мнемосхем (N) на этапах пуско-наладки и эксплуатации соответственно.

Полученные зависимости времен модификации ПО от числа мнемосхем для этапов пуско-наладки и эксплуатации представлены на графиках (рис. 9 и 10 соответственно), где они аппроксимированы методом наименьших квадратов линейными функциями, которые являются функциями обслуживания.

Таким образом, функции обслуживания для этапа пуско-наладки:

$$N_{auto} = 52,31(t - 0,24),$$
  
 $N_{DR} = 34,35(t - 0,22);$  (5)

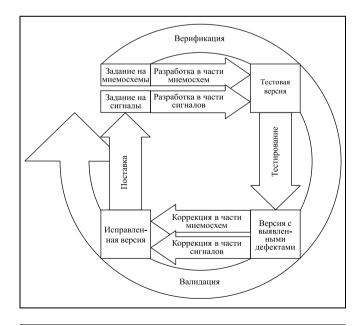


Рис. 8. Цикл разработки (модификации) ПО



для этапа эксплуатации:

$$N_{auto} = 52,31(t-0,12),$$
 $N_{auto, edit} = 33,39(t-0,12),$ 
 $N_{DB} = 34,35(t-0,09),$ 
 $N_{DB, edit} = 25,03(t-0,09).$  (6)

#### 2.4. Численные результаты

Для расчета максимального времени модификации программного обеспечения АСУТП первого энергоблока АЭС «Куданкулам» на этапе эксплуатации применим однокомпонентную модель. Характеристики входного потока приведены в п. 2.2, функции обслуживания — в формулах (6). Максимальные времена модификации ПО, вычисленные по формуле (2):

$$d_{auto}=0,64$$
 раб. дн.,  $d_{auto,\;edit}=0,93$  раб. дн.,  $d_{DB}=0,88$  раб. дн.,  $d_{DB,\;edit}=1,17$  раб. дн.

Для расчета максимального времени модификации ПО на этапе пуско-наладки применим двухкомпонентную модель. Огибающая входного потока и функции обслуживания описываются формулами (4) и (5) соответственно. Максимальные времена модификации ПО, вычисленные по формуле (3):

$$d_{auto} = 1,96$$
 раб. дн.,  $d_{DB} = 2,84$  раб. дн.

Отметим, что полученные численные значения полностью подтвердились фактическими работами по модификации программного обеспечения АСУТП первого энергоблока АЭС «Куданкулам», время которой, как правило, не превышало 0,7 от этих значений.

Подобный расчет максимального времени модификации ПО был проведен также для второго энергоблока. Было вычислено максимальное вре-

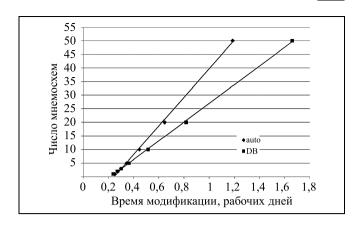


Рис. 9. Зависимость времени модификации ПО от числа мнемосхем на этапе пуско-наладки

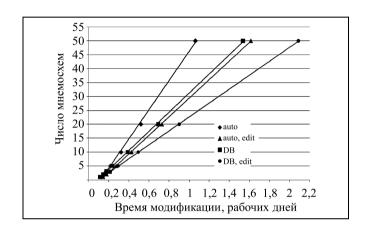


Рис. 10. Зависимость времени модификации ПО от числа мнемосхем на этапе эксплуатации

мя модификации ПО для установившегося потока первых шести месяцев этапа пуско-наладки ( $d_{auto}=0.7$  раб. дн.,  $d_{DB}=0.9$  раб. дн.). На протяжении последующего времени (более одного го-

#### Зависимость времени модификации ПО от числа мнемосхем на этапе пуско-наладки

Таблица 2

<i>t<sub>auto</sub></i> , раб. дн.	0,2479	0,2729	0,2979	0,3417	0,4458	0,6458	1,1875
<i>t<sub>DB</sub></i> , раб. дн.	0,2354	0,2688	0,3	0,3625	0,5146	0,8167	1,6625
N	1	2	3	5	10	20	50

Таблица 3

#### Зависимость времени модификации ПО от числа мнемосхем на этапе эксплуатации

$t_{auto}$ , раб. дн.	0,1229	0,1479	0,1729	0,2167	0,3208	0,5208	1,0625
$t_{auto,edit}$ , раб. дн.	0,1438	0,1792	0,2104	0,2729	0,425	0,7292	1,6146
<i>t<sub>DB</sub></i> , раб. дн.	0,1104	0,1438	0,175	0,2375	0,3896	0,6917	1,5375
<i>t<sub>DB,edit</sub>,</i> раб. дн.	0,1313	0,175	0,2125	0,2938	0,4938	0,9	2,0896
N	1	2	3	5	10	20	50



да) полученные значения успешно использовались для прогноза времени модификации ПО. Фактическое время модификации не превышало 0,7 от расчетного.

#### 2.5. Выводы

Результаты, полученные для ПО (в части информационной базы сигналов и графических мнемосхем) АСУТП АЭС «Куданкулам», действительны также для программного обеспечения АСУТП других АЭС. Экспериментально установлено, что процесс модификации ПО характеризуется высокой скоростью обслуживания (R), небольшой задержкой обслуживания (Т) и невысокой скоростью входного потока (r). Максимальное время модификации в этом случае всегда вычисляется по формуле (2), а двухкомпонентная модель вырождается в однокомпонентную. Из опыта стало также известно, что на этапе проектирования АСУТП АЭС входной поток сильно разрежен, поэтому результат очевиден, и применение аппарата «Network calculus» нецелесообразно. На этапах пуско-наладки и эксплуатации поток имеет более стабильные характеристики, и расчет максимального времени модификации может быть проведен. При этом в соответствии с экспериментальными данными, параметры максимального размера пакета (b) следует считать равными 0,6 и 0,2 от максимального числа мнемосхем в проектах информационной базы для этапов пуско-наладки и эксплуатации соответственно.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложен метод расчета гарантированного (максимального) времени разработки версии ПО (модификации ПО) с длительным, итерационным процессом разработки на основе аппарата «Network calculus». Метод особенно актуален для больших промышленных систем с высоким экономическим риском в случае простоя и объектов повышенного риска эксплуатации.

Исследована применимость метода для расчета максимального времени модификации программного обеспечения АСУТП АЭС на этапах пусконаладки и эксплуатации для различных способов модификации. Полученные численные значения подтвердились фактическими работами по модификации ПО, время которой, как правило, не превышало 0,7 от этих значений.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. *Ройс У.* Управление проектами по созданию программного обеспечения. М.: ЛОРИ, 2002. 424 с.
- 2. Голубева Т.А. Структурно-логическая модель прогнозирования времени выполнения проекта разработки програм-

- 3. *Jørgensen M*. A review of studies on expert estimation of software development effort // Journal of Systems and Software. Feb. 2004. Vol. 70, iss. 1—2. P. 37—60.
- Голубева Т.А., Дубовая Ю.В., Шелест В.С. Нечеткое прогнозирование времени разработки программного обеспечения // Вестник Винницкого политехн. ин-та. — 2011. — № 3. — С. 158—161.
- Idri A., Amazal F., Abran A. Analogy-based software development effort estimation: A systematic mapping and review // Information and Software Technology. Feb. 2015. Vol. 58. P. 206—230.
- Royce W. Managing the development of large software systems // Proc. of IEEE WESCON 26. — August 1970. — P. 328—338.
- 7. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
- Абу-Абед Ф.Н., Глодева Е.А., Допира Р.В. Многофазные модели эксплуатации сложных технических систем // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике, Пенза, 13—14 ноября 2014 г.: Сб. статей XIV междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 2014. — С. 15—21.
- 9. *Опыт* проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУТП АЭС / М.Е. Бывайков, Е.Ф. Жарко, Н.Э. Менгазетдинов и др. // Автоматика и телемеханика. 2006. № 5. С. 65—79.
- Le Boundec J.-Y., Thiran P. Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet/Online Version of the Book Springer Verlag. — LNCS 2050. Version April 26, 2012.
- 11. *Vantanski N.*, et al. Compensating the transmission delay in networked control systems // 14th Nordic process control workshop, NPCW07, Espoo, Finland, 2007.
- Hwangnam Kim Hou, J.C. Network calculus based simulation for TCP congestion control: theorems, implementation and evaluation // INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Publication Date: 7—11 March, 2004. — Vol. 4. — P. 2844—2855.
- Масолкин С.И., Промыслов В.Г. Расчет некоторых параметров промышленной вычислительной сети объектов повышенного риска эксплуатации на примере АСУТП АЭС // Проблемы управления. 2010. № 1. С. 47—52.
- 14. Louis Baccelli et al. Synchronization and Linearity An Algebra for Discrete Event Systems (Wiley Series in Probability and Statistics) N.-Y.: John Wiley & Sons, 1992. 514 p.
- Turner J. New Directions in Communications (or which way to the information age?) // IEEE Communications Magazine. — 1986. — Vol. 24, N 10. — P. 8—15.
- Sidi M., Liu, W.-Z., Cidon, I., Gopal I. Congestion control through input rate regulation // IEEE Trans. on Communications. — 1993. — Vol. 41, iss. 3. — P. 471—477.
- Cruz R.L. A Calculus for Network Delay. Part I: Network Elements in Isolation // IEEE Trans. on Information Theory. Jan. 1991. Vol. 37. P. 114—131.
- Cruz R.L. A calculus for network delay. Part II: Network analysis Information Theory // IEEE Trans. on Information Theory. Jan. 1991. Vol. 37. P. 132—141.
   Mohd R., Nazir M. Software Reliability Growth Models:
- Mohd R., Nazir M. Software Reliability Growth Models: Overview and Applications // Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences. — Sep. 2012. — Vol. 3, N 9. — P. 1309—1320.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневским.

**Байбулатов Артур Арсенович** — науч. сотрудник, ы baibulatov@mail.ru.

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

УДК 004.942; 519.172.5

# ОРГАНИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ НЕИСПРАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СО СТРУКТУРОЙ МИНИМАЛЬНОГО КВАЗИПОЛНОГО ГРАФА РАЗМЕРА 7×7 С ДВУМЯ ПУТЯМИ МЕЖДУ ДВУМЯ АБОНЕНТАМИ

В.А. Ведешенков

Предложена организация диагностирования, основанная на использовании единого теста контроля и 14 подмножеств из четырех дополнительных проверок для каждой «неисправной» подсистемы. Предложен вариант построения подмножества диагностических проверок, обеспечивающий единообразие синдромов проверки компонентов с одинаковыми номерами в любой «неисправной» подсистеме. Отмечено, что требуемая точность диагностирования гарантирована различием синдромов проверки в любой «неисправной» подсистеме. Приведен пример применения алгебро-логического метода для дешифрации результатов проверок.

**Ключевые слова:** цифровая система, минимальный квазиполный граф размера 7×7, компонент, синдром проверки, «неисправная» подсистема.

#### ВВЕДЕНИЕ

Минимальный квазиполный граф образуется на основе однородного двудольного графа, одну долю которого составляют коммутаторы  $m \times m$ , а другую — *т*-портовые абоненты. В одной доле имеется N коммутаторов, а в другой — N абонентов. Для рассматриваемых топологий параметры Nи *m* связаны соотношением  $N = m(m-1)/\sigma + 1$  и не могут быть взяты произвольно. Значение *т* выбирается минимальным, при котором любые два узла в одной доле связаны о путями длины два через разные узлы в другой доле. Каждый такой путь проходит через один коммутатор, и разные пути проходят через разные коммутаторы [1—3]. (Далее такие коммутаторы будем называть парными для абонентов, которые они соединяют; например, на рисунке коммутаторы 8 и 9 (10 и 12, 11 и 14) являются парными для абонентов 1 и 2(3 и 6, 4 и 7)соответственно.

В числе возможных областей применения графов с подобной новой структурой называют отказоустойчивые многомашинные вычислительные

системы (МВС) реального времени, где, например, подмножество вершин одной доли представляет собой совокупность процессорных элементов или вычислительных машин, а подмножество вершин другой доли — коммутаторы [4, 5].

Пример такого графа размера  $7 \times 7$  показан на рисунке для случая N = 7, m = 4,  $\sigma = 2$ .

В работе [6] рассматривалась задача оценивания предельных возможностей достоверного диагностирования числа неисправных компонентов (абонентов, коммутаторов) цифровой системы (ЦС) со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами. Показано, что на выбранной системе тестов анализируемые ЦС являются не больше чем 1-диагностируемыми для неисправных абонентов, 2-диагностируемыми для неисправных коммутаторов и 1,1-диагностируемыми для кратной неисправности абонента и коммутатора.

Однако представляет безусловный интерес организация системы диагностирования, достоверно идентифицирующей местоположение (номер) одиночного неисправного компонента. Цель на-



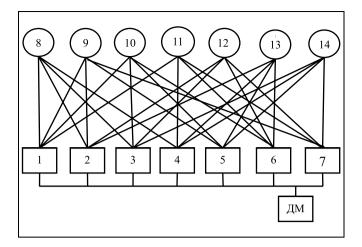


Схема цифровой системы со структурой минимального квазиполного графа  $S_{7,4,2}$  размера  $7 \times 7$  с двумя путями между двумя абонентами: 1-7 — абоненты; 8-14 — коммутаторы;  $\mathcal{A}M$  диагностический монитор

стоящей работы заключается в разработке системы диагностирования одиночного неисправного компонента ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами.

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходная МВС со структурой минимального квазиполного графа  $S_{N,m,\sigma}$  размера  $7\times7$  с двумя путями между двумя абонентами представлена диагностическим графом, у которого N вершин одной доли представляют абоненты (процессоры) системы, N вершин другой доли — коммутаторы, причем каждый абонент связан с каждым другим абонентом двумя путями, проходящими через два разных коммутатора.

Будем считать, что допускается устойчивая неисправность одного из компонентов: абонента, коммутатора, линии связи, причем неисправность компонента такова, что прекращает работу того компонента, в котором она возникла, и не влияет на работоспособность смежных компонентов.

В диагностировании ЦС участвует исправный диагностический монитор (ДМ), который находится в модуле, внешнем по отношению к диагностируемой ЦС.

Требуется разработать организацию диагностирования, обеспечивающую достоверное диагностирование одиночного неисправного компонента ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами.

#### 2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО НЕИСПРАВНОГО КОМПОНЕНТА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ

Процесс диагностирования компонентов ЦС включает в себя процедуры [6]:

- исполнение исправным модулем функций проверяющего модуля;
- нахождение пути от одного исправного модуля к другому исправному для передачи ему функций проверяющего модуля;
- передача управления следующему исправному проверяющему модулю;
- дешифрация результатов выполненных проверок.

Реализация этих процедур в ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами организована следующим образом [6].

Проверяющим модулем  $m_j$  назначен абонент  $A_j$ ,  $j=1,\ldots,7$ , а в проверяемую подсистему  $U_{i,k}$  включены компоненты: коммутатор  $p_i$ , абонент  $A_k$ , линия связи  $l_{i-k}$  между ними, линия связи  $l_{j-i}$ , соединяющая абонента  $A_j$  с коммутатором  $p_i$ , а также линии связи  $l_{k-i}$  и  $l_{i-j}$ , по которым ответ приходит к абоненту  $A_j$ , причем  $k \neq j$ . Например, для ЦС (см. рисунок) для реализации одной из проверок абонент  $A_5$  будет исполнять функции проверяющего модуля  $m_5$ , а в проверяемую подсистему будут входить коммутатор  $p_9$ , абонент  $A_2$  и линии связи  $l_{5-9}$ ,  $l_{9-2}$ ,  $l_{9-5}$  и  $l_{2-9}$ .

Тогда отдельная проверка (тест  $P_{i,i,k}$ ) выполняется следующим образом. Получив управление в процессе диагностирования, проверяющий абонент  $A_i$  передает через коммутатор  $p_i$  и линии связи  $l_{i-i}$  и  $l_{i-k}$  проверяемому абоненту  $A_k$  запрос о его состоянии. Исправный абонент  $A_k$  передает ответ через коммутатор  $p_i$  и линии связи  $l_{k-i}$  и  $l_{i-j}$  проверяющему абоненту  $A_{j}$ , который, получив ответ, формирует оценку  $r_{i.k}$ : = 0 (подсистема «исправна»); если в течение интервала  $\Delta \tau$  ответ не придет, то  $r_{i,k}$ : = 1 (подсистема «неисправна»). На основании полученных оценок абонент  $A_i$  выбирает исправную подсистему  $U_{i^*, \, k^*}$ , абоненту  $A_{k^*}$  из состава которой передает управление и необходимую информацию для продолжения процесса диагностирования.

Наконец, абонент  $A_{k^{**}}$ , выполнив функции проверяющего и не обнаружив в накопленных данных ни одного исправного абонента, не исполнявшего функций проверяющего, закончит процесс диа-



гностирования и перейдет к дешифрации полученных оценок проверок.

Цель дешифрации — преобразовать полученные оценки проверок в списки исправных компонентов и компонентов, подозреваемых в неисправности. Для дешифрации результатов проверок и формирования диагноза применяется алгебрологический метод [7].

Результаты дешифрации абонент  $A_{k^{**}}$  через ДМ передает обслуживающему персоналу для проведения восстановительных работ (замены исправным компонента, подозреваемого в неисправности).

В табл. 1 для ЦС (см. рисунок) показана информация о составе проверяемых подсистем  $U_{i,k}$  и номерах проверяющих их абонентов  $A_j$ : для абонента  $A_j$ ,  $j=5,\,1,\,...,\,7$  записаны номера компонентов и линий связи, входящих в состав подсистем  $U_{i1,k1}$  и  $U_{i2,k2}$ , проверяемых абонентом  $A_j$  при исполнении проверок строки  $T_j$ .

Отметим, что в клетках строк  $T_5$ , ...,  $T_7$  табл. 1 показаны номера индексов проверяющего абонента и проверяемых подсистем без символов абонента A, проверяемой подсистемы U и линии связи I, поскольку эти номера однозначно определяют тип компонента. Отметим также, что в записи каждой подсистемы коммутатор вписан дважды, чтобы сохранить порядок прохождения информации при выполнении данной проверки. В табл. 1 выделены клетки для записи оценок результатов проверки  $r_{i1,k1}$ ,  $r_{i2,k2}$  соответствующих подсистем абонентом  $A_i$ .

Приведенная выше организация диагностирования предполагает обход всех исправных абонентов, выполнение ими функций проверяющих модулей в отношении смежных подсистем, показанных в соответствующей строке табл. 1, анализ

результатов выполненных проверок, передачу накопленной информации и управления следующему исправному абоненту, последний из которых выполняет дешифрацию полученных результатов проверок и формирует диагноз, который передает в ЛМ.

Все эти действия проводятся независимо от числа и типов неисправных компонентов, предполагаемых в составе диагностируемой ЦС. Однако довольно вероятна ситуация, когда в функционирующей ЦС возникает отказ одного компонента. Для обнаружения (не диагностирования) неисправности любого компонента достаточно, чтобы его неисправность проявлялась хотя бы на одной из выполненных проверок. В табл. 1 показан вариант системы проверок, в которых номер любой линии связи в ЦС (см. рисунок) вписан только один раз. Что касается абонентов и коммутаторов, то номер каждого из них встречается в табл. 1 два раза.

Число единичных оценок среди результатов выполненных проверок совпадает с числом неисправных компонентов, обнаруженных на множестве выполненных проверок. Следовательно, при неисправности только одной линии связи ЦС в результатах выполнения проверок из табл. 1 будет только одна единичная оценка, указывающая, что в составе данной проверяемой подсистемы есть неисправная линия связи. Согласно записям в табл. 1 неисправность одного абонента или коммутатора может обнаруживаться на двух проверках.

С учетом этих фактов остановим процесс контроля работоспособности при получении первого единичного результата и перейдем к диагностированию неисправного компонента из числа тех шести, которые входят в состав подсистемы с единичной оценкой (назовем ее для последующих ссылок «неисправной»).

Таблица 1

#### Таблица состава проверяемых подсистем

Строки	Абонент	Проверяемые подсистен	Проверяемые подсистемы $U_{i,k}$ , оценки результатов их проверок $r_{i,k}$							
$T_{j}$	$A_{j}$	$U_{i1,k1}$	$r_{i1,k1}$	$U_{i2,k2}$	$r_{i2,k2}$					
$T_5$	5	(5-9), 9, (9-1), 1, (1-9), 9, (9-5)		(5-13), 13, (13-2), 2, (2-13), 13, (13-5),						
$T_1$	1	(1-10), 10, (10-3), 3, (3-10), 10, (10-1)		(1-11), 11, (11-6), 6, (6-11), 11, (11-1)						
$T_3$	3	(3-8), 8, (8-2), 2, (2-8), 8, (8-3)		(3-14), 14, (14-4), 4, (4-14), 14, (14-3)						
$T_2$	2	(2-12), 12, (12-6), 6, (6-12), 12, (12-2)		(2-9), 9, (9-7), 7, (7-9), 9, (9-2)						
$T_6$	6	(6-13), 13, (13-4), 4, (4-13), 13, (13-6)		(6-10), 10, (10-5), 5, (5-10), 10, (10-6)						
$T_4$	4	(4-11), 11, (11-7), 7, (7-11), 11, (11-4)		(4-8), 8, (8-1), 1, (1-8), 8, (8-4)						
$T_7$	7	(7-14), 14, (14-5), 5, (5-14), 14, (14-7)		(7-12), 12, (12-3), 3, (3-12), 12, (12-7)						



Рассмотрим пример. Предположим, что при проведении контроля работоспособности рассматриваемой ЦС, результаты которого показаны в табл. 2, абонент 5 сформировал две нулевые оценки, а абонент 1 сформировал единичную оценку для подсистемы  $U_{i2,k2}$  — [(1-11), 11, (11-6), 6, (6-11), 11, (11-1)]. Эта же «неисправная» подсистема показана в строке 0 табл. 3.

Дополнительные проверки, необходимые для диагностирования неисправного компонента из состава этой подсистемы, показаны в строках 1-4 табл. 3. Полужирным шрифтом выделены компоненты, не входящие в состав «неисправной» подсистемы. В клетках правой части табл. 3 показаны синдромы  $R_l$  (результаты проверок 1-4) в предположении, что неисправен компонент «неисправной» подсистемы: линия связи (1-11), коммутатор 11, линия связи (11-6), абонент 6, линия связи (6-11), линия связи (11-1), — номером которого озаглавлен соответствующий столбец. (Содержание столбца  $R_l^*$  и строки «Диагноз» будет пояснено в следующем параграфе.)

Различие синдромов  $R_l$ , показанных в столбцах табл. 3, обеспечивает однозначный диагноз любо-

го неисправного компонента  $K_l$  при использовании проверок, показанных в строках 1-4 табл. 3.

Рассмотрим способ построения дополнительных проверок, обеспечивающих диагностирование с точностью до одного из компонентов «неисправной» подсистемы. Для того, чтобы обеспечить такую точность диагностирования, каждая из дополнительных проверок должна включать в свой состав только некоторые из компонентов «неисправной» подсистемы.

В строке 0 обобщенной диагностической таблицы (табл. 4) показаны компоненты «неисправной» подсистемы, соединенные стрелками, отражающими направление передачи информации между соседними компонентами. В строках 1-4 табл. 4 таким же способом показаны компоненты дополнительных проверок, обеспечивающих идентификацию неисправного компонента в составе «неисправной» подсистемы. В клетках строки «Диагноз» табл. 4 показаны компоненты  $K_1, K_2, ..., K_6$ , с точностью до одного из которых обеспечивается диагностирование.

Для сравнения напомним, что в строке 0 табл. 3 компоненты «неисправной» подсистемы имеют

Таблица 2

#### Таблица контроля

Строки	Абонент	Проверяемые подсистем	Проверяемые подсистемы $U_{i,k}$ , оценки результатов их проверок $r_{i,k}$							
$T_{j}$	$A_{j}$	$U_{i1,k1}$	$r_{i1,k1}$	$U_{i2,k2}$	$r_{i2,k2}$					
$T_5$	5	(5-9), 9, (9-1), 1, (1-9), 9, (9-5)	0	(5-13), 13, (13-2), 2, (2-13), 13, (13-5)	0					
$T_1$	1	(1-10), 10, (10-3), 3, (3-10), 10, (10-1)	0	(1-11), 11, (11-6), 6, (6-11), 11, (11-1)	1					

#### Таблица 3

#### Диагностическая таблица

№	Або-	Проверяемые подсистемы $U_{i,k}$	Синдром $R_l$ при неисправном компоненте $K_l$								
п/п	нент $A_j$	проверяемые подейстемы $O_{i,k}$	$R_l^*$	(1-11)	11	(11-6)	6	(6-11)	(11-1)		
0	1	$(1-11) \to 11 \to (11-6) \to 6 \to (6-11) \to 11 \to (11-1)$	1	1	1	1	1	1	1		
1	1	$(1-11) \to 11 \to (11-4) \to 4 \to (4-11) \to 11 \to (11-1)$	1	1 <sub>1</sub>	1 <sub>1</sub>	01	01	01	11		
2	1	$(1-11) \to 11 \to (11-6) \to 6 \to$ (6-10) $\to$ 10 $\to$ (10-1)	1	12	12	1,	1,	02	01		
3	1	$(1-10) \rightarrow 10 \rightarrow (10-6) \rightarrow 6 \rightarrow (6-11) \rightarrow 11 \rightarrow (11-1)$	0	01	1 <sub>3</sub>	02	12	11	12		
4	1	$(1-10) \to 10 \to (10-6) \to 6 \to (6-10) \to 10 \to (10-1)$	0	02	01	03	1 <sub>3</sub>	03	02		
	Диагноз		<i>l</i> <sub>1-11</sub>	<i>l</i> <sub>1-11</sub>	$c_{11}^{}$	l <sub>11-6</sub>	$a_6$	l <sub>6-11</sub>	<i>l</i> <sub>11-1</sub>		



конкретные номера:  $K_1$  — линия связи (1-11),  $K_2$  — коммутатор 11,  $K_3$  — линия связи (11-6),  $K_4$  — абонент 6,  $K_5$  — линия связи (6-11),  $K_6$  — линия связи (11-1). В строках 1—4 табл. 3 таким же способом показаны компоненты дополнительных проверок, обеспечивающих идентификацию неисправного компонента в составе «неисправной» подсистемы.

В проверку строки 1 табл. 4 включены дополнительные компоненты  $A_1$  (абонент),  $l_1$  и  $l_2$  (линии связи). Конкретные номера этих компонентов найдем с учетом того, что цепочка  $(l_1 \to A_1 \to l_2)$  находится между двумя компонентами  $K_2$  (коммутатор), через которые она связана с компонентом  $K_0$ (начальным абонентом для всех пяти проверок). По таблице связей (или по графу ЦС, см. рисунок) найдем, что для  $K_0$  (в табл. 3 — абонент 1) и  $K_2$ (коммутатор 11) в качестве  $A_1$  можно использовать абоненты 4, 6, 7, но абонент 6 входит в «неисправную» подсистему, поэтому в табл. 3 для проверки 1 выбран абонент 4. Знание номеров абонента  $A_1$ (номер 4) и компонента  $K_2$  (номер 11) позволяет однозначно определить номера  $l_1$  (11-4) и  $l_2$  (4-11). Такое построение пути проверки 1 позволяет передать ответ абонента 4 на запрос абонента 1 путем, в котором не участвуют абонент 6 и линии связи (6-11) и (11-1) из «неисправной» подсистемы табл. 3.

В проверку строки 2 табл. 4 входят компоненты  $C_1$  (коммутатор) и  $I_3$ ,  $I_4$  (линии связи). Их конкретные номера найдем с учетом того, что цепочка ( $I_3 \to C_1 \to I_4$ ) находится между компонентами  $K_4$  и  $K_0$  (абонентами 6 и 1 в строке 2 табл. 3). В таблице связей анализируемой ЦС для абонентов 6 и 1 парными коммутаторами являются 10 и 11. В качестве компонента  $C_1$  выбираем коммутатор 10. Знание номеров коммутатора  $C_1$  (номер 10) и абонентов  $K_4$ 

(номер 6) и  $K_0$  (номер 1) позволяет однозначно определить номера  $l_3$  (6-10) и  $l_4$  (10-1). Такое построение пути проверки 2 позволяет передать ответ абонента 6 на запрос абонента 1 путем, в котором не участвуют коммутатор 11 и линии связи (6-11) и (11-1) из «неисправной» подсистемы табл. 3.

В проверку третьей строки включены те же основные компоненты  $K_0$ ,  $K_4$ ,  $K_2$  и  $C_1$ , что и во вторую проверку, но направления проверок инверсны друг к другу. Поэтому линии связи  $l_5$  и  $l_6$  в 3-й проверке [(1-10), (10-6)] инверсны линиям связи  $l_3$  и  $l_4$  во 2-й проверке [(10-1), (6-10)], а в реализации третьей проверки не участвуют коммутатор 11 и линии связи (1-11) и (11-6).

В четвертой проверке компонент  $K_4$  (абонент 6) проверяется по путям, отличным от путей 1-й проверки и проходящим через компонент  $C_1$  (коммутатор 10), парный компоненту  $K_2$  (коммутатору 11) относительно компонентов  $K_0$  и  $K_4$  (абонентов 1 и 6). Отсюда естественное вхождение компонентов  $l_5$ ,  $l_6$ ,  $l_3$ ,  $l_4$  (линий связи (1-10), (10-6), (6-10), (10-1)) в состав 4-й проверки и отсутствие компонентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  (в нашем примере — коммутатора 11, линий связи (1-11), (11-6), (6-11), (11-1)).

Логическое подобие проверок, приведенных в табл. 3 и 4, обеспечивает единообразие получаемых результатов проверок и позволяет записать в правой части табл. 4 значения синдромов  $R_l$  (результатов проверок), совпадающие со значениями соответствующих синдромов в табл. 3.

Представленные в данном параграфе некоторые аспекты диагностирования одиночного неисправного компонента в рассматриваемой ЦС позволяют сформулировать следующий способ организации такого диагностирования.

Таблица 4 Обобщенная диагностическая таблица

No = /=	$№ п/п$ Абонент $K_0$	Проверяемые подсистемы		Синдром $R_I$						
JNº 11/11	Adoneni K <sub>0</sub>			$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	
0	$K_0$	$K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow K_3 \rightarrow K_4 \rightarrow K_5 \rightarrow K_2 \rightarrow K_6$	1	1	1	1	1	1	1	
1	$K_0$	$K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow l_1 \rightarrow A_1 \rightarrow l_2 \rightarrow K_2 \rightarrow K_6$	*	1	1	0	0	0	1	
2	$K_0$	$K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow K_3 \rightarrow K_4 \rightarrow l_3 \rightarrow C_1 \rightarrow l_4$	*	1	1	1	1	0	0	
3	$K_0$	$l_5 \rightarrow C_1 \rightarrow l_6 \rightarrow K_4 \rightarrow K_5 \rightarrow K_2 \rightarrow K_6$	*	0	1	0	1	1	1	
4	$K_0$	$l_5 \rightarrow C_1 \rightarrow l_6 \rightarrow K_4 \rightarrow l_3 \rightarrow C_1 \rightarrow l_4$	*	0	0	0	1	0	0	
	'	Диагноз	$K_l^*$	<i>K</i> <sub>1</sub>	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	<i>K</i> <sub>6</sub>	



По команде ДМ о начале диагностирования начальный абонент  $A_i$  (в табл. 1 абонент 5) выполняет необходимые действия по реализации двух проверок из строки  $T_5$  табл. 1. При получении нулевых результатов абонент 5 передает управление для продолжения проверок абоненту 1 (из следующей строки табл. 1), который при нулевых результатах передает управление абоненту 2 из следующей строки и т. д. до получения единичного результата. Абонент  $A_i^*$ , получивший единичный результат для одной из двух проверок своей строки  $T_i$ , переходит к процедурам диагностирования:

- находит в памяти четыре проверки, построенные для диагностирования компонентов «неисправной» подсистемы, соответствующей данному единичному результату;
- организует выполнение этих проверок, что возможно, так как проверяющим модулем для них назначен абонент  $A_i^*$ ;
- собирает результаты выполненных проверок, сравнивает сформированный синдром  $R_l^*$  со столбцами табл. 4;
- при совпадении с одним из столбцов считает диагнозом номер компонента, записанного в соответствующей клетке строки «Диагноз», который вместе с результатами проверок пересылает через ДМ обслуживающему персоналу для замены обнаруженного неисправного компонента;
- при несовпадении синдрома  $R_I^*$  ни с одним из столбцов табл. 4 считает, что полученной информации недостаточно, нужны дополнительные диагностические процедуры.

Предлагается следующая организация этих процедур:

- 1) продолжить выполнение проверок, оставшихся в табл. 1, исключив из числа проверяющих тот абонент, который входит в состав обнаруженной ранее «неисправной» подсистемы;
- 2) при получении единичного результата проверки для второй обнаруженной «неисправной» подсистемы выполнить 4 соответствующие дополнительные проверки, провести дешифрацию полученного синдрома, синдром и результат дешифрации переслать в ДМ для информации обслуживающего персонала;
- 3) если проверка с единичным результатом не является последней в табл. 1, то вернуться в п. 1, если в табл. 1 выполнены все проверки, то переслать в ДМ информацию об окончании диагностических процедур.

Обслуживающий персонал, получив информацию о дешифрации синдромов дополнительных

проверок всех обнаруженных «неисправных» подсистем и проанализировав ее, сможет принять более обоснованное решение об идентификации неисправного компонента.

#### 3. ДЕШИФРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕРОК

Для подтверждения результатов диагностирования, показанных в строке «Диагноз» табл. 4, выполним дешифрацию результатов дополнительных проверок для «неисправной» подсистемы из клетки  $T_{12}$  табл. 1. Для этого вернемся к табл. 3, в столбцах правой части которой показаны синдромы  $R_I$ проверок из строк 1—4 в предположении неисправности одного из компонентов «неисправной» подсистемы, показанной в строке 0.

Предполагаемый характер функционирования компонентов «работа — отказ» позволяет описывать техническое состояние компонента двоичной переменной: исправен — 0, неисправен — 1 и использовать алгебрологический метод [7] для дешифрации результатов, показанных в столбцах

Напомним основные положения этого метода, несколько модифицированного применительно к рассматриваемому примеру.

А. Обозначим переменной  $\overline{m_n}$  исправное состояние компонента с номером n, а переменной  $m_n$  неисправное состояние компонента с номером n, т. е. для этих переменных справедливы логические соотношения:

- компонент n исправен  $\overline{m_n} = 1$ ,  $m_n = 0$ ,
- компонент n неисправен  $\overline{m_n} = 0$ ,  $m_n = 1$ .

Функцию технического состояния компонентов с номерами  $n_1, n_2, ..., n_k$  запишем так:

— при нулевом результате их проверки тестом  $r_i$ (обозначим оценку  $\overline{r}_i$ ):

$$\overline{F}_j = \overline{m_{n1}} \wedge \overline{m_{n2}} \wedge ... \wedge \overline{m_{nk}}$$
 (все компоненты исправны).

- при единичном результате их проверки тестом  $r_i$  (обозначим оценку  $r_i$ ):

$$F_j = m_{n1} \vee m_{n2} \vee ... \vee m_{nk}$$
 (хотя бы один из компонентов неисправен).

Б. Метод дешифрации результатов тестирования ЦС на множестве проверок  $p_1, p_2, ..., p_k$  состоит из следующих этапов.



- 1. Для каждого результата  $\overline{r_j}$  ( $r_j$ ) записать функцию  $\overline{F_j}$  ( $F_j$ ), в которую подставить номера компонентов, взятые из состава проверки  $p_i$ .
- 2. Для упрощения последующих преобразований в сформированных функциях  $\overline{F}_j$  и  $F_j$  оставить только те переменные, которые входят в «неисправную» подсистему, приведенную в 0-й строке табл. 3 (в предположении, что остальные компоненты ЦС исправны и не могут войти в число подозреваемых в неисправности).
- 3. Сформировать функцию Ф как конъюнкцию всех функций  $F_j$  и  $\overline{F}_j$ , упростить дизъюнктивные члены функций  $F_j$ , вычеркнув те переменные, для которых в функциях  $\overline{F}_j$  есть одноименные переменные с отрицанием (с чертой сверху).
- 4. Произвести конъюнктивное перемножение оставшихся членов функций  $F_j$ , выполнить поглощение членов большей длины членами меньшей длины. При этом будут полезны известные формулы:

$$\overline{m_n} \wedge m_n = 0, \ \overline{m_n} \vee m_n = 1;$$

$$\overline{m_n} \wedge (\overline{m_n} \vee \overline{m_p}) = \overline{m_n}.$$

- 5. Выделить из полученного логического выражения члены минимальной длины. Они определяют диагноз: подмножество компонентов, подозреваемых в неисправности по результатам выполненных проверок.
- В. Перейдем к дешифрации синдромов  $R_l$  из табл. 3, в которой для упрощения последующих ссылок введем нижний индекс, отражающий порядковый номер цифры (0 или 1) в каждом столбце отдельно. (Единицы в клетках строки 0 не влияют на различимость компонентов этой подсистемы, а потому при дешифрации не учитываются.)

Построим необходимые логические функции для результатов столбца  $R_1$  (напомним, что в приведенных ниже формулах функций оставлены переменные только тех компонентов, которые входят в проверку из 0-й строки):

$$\begin{split} F_1 &= l_{1\text{-}11} \lor c_{11} \lor l_{11\text{-}1}; \\ F_2 &= l_{1\text{-}11} \lor c_{11} \lor l_{11\text{-}6} \lor a_6; \\ \overline{F}_1 &= \overline{a}_6 \land \overline{l_{6\text{-}11}} \land \overline{c_{11}} \land \overline{l_{11\text{-}1}}; \\ \overline{F}_2 &= \overline{a}_6, \end{split}$$

где переменные  $l_{1-11}$ ,  $l_{11-1}$ ,  $l_{11-6}$ ,  $c_{11}$ ,  $a_6$  присвоены линиям связи (1-11), (11-1), (11-6), коммутатору 11, абоненту 6 соответственно. Тогда конъюнкция функций  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $\overline{F_1}$ ,  $\overline{F_2}$  будет иметь вид (после вычеркивания повторяющихся переменных):

$$\Phi(R_1) = [l_{1-11} \lor c_{11} \lor l_{11-1}] \land [l_{1-11} \lor c_{11} \lor l_{11-1} \lor a_6] \land A \overline{a_6} \land \overline{l_{6-11}} \land \overline{c_{11}} \land \overline{l_{11-1}};$$

а после вычеркивания из скобок переменных  $c_{11}$ ,  $l_{11-1}$ ,  $a_6$ , для которых в функции Ф есть переменные с отрицанием, получим правильный диагноз:

$$\Phi(R_1) = \\ = I_{1-11} \wedge \overline{I_{6-11}} \wedge \overline{c_{11}} \wedge \overline{I_{11-1}} \wedge \overline{a_6} \wedge \overline{I_{2-13}} \wedge \widetilde{I_{11-6}},$$

подтверждающий неисправность линии связи (1-11), исправность коммутатора 11, абонента 6, линий связи (6-11), (11-1), что касается линии связи (11-6), то ее состояние осталось не идентифицированным. Именно неисправность линии связи (1-11) показана в строке «Диагноз» для синдрома  $R_1$ .

Выполнив аналогичные построения для синдромов  $R_2$ , ...,  $R_6$ , получим следующие функции  $\Phi(R_2)$ , ...,  $\Phi(R_6)$ :

$$\begin{split} \Phi(R_2) &= c_{11} \wedge \overline{a_6} \vee \overline{a_6} \wedge [l_{1\text{-}11} \wedge l_{6\text{-}11} \vee l_{1\text{-}11} \wedge \\ & \wedge l_{11\text{-}1} \vee l_{11\text{-}1} \wedge l_{11\text{-}6}], \end{split}$$
 
$$\Phi(R_3) &= l_{11\text{-}6} \wedge \overline{l_{1\text{-}11}} \wedge \overline{c_{11}} \wedge \overline{l_{11\text{-}1}} \wedge \overline{a_6} \wedge \overline{l_{6\text{-}11}}, \\ \Phi(R_4) &= a_6 \wedge \overline{c_{11}} \wedge \overline{l_{1\text{-}11}} \wedge \overline{l_{11\text{-}1}} \wedge \overline{l_{6\text{-}11}} \wedge \overline{l_{11\text{-}6}}, \\ \Phi(R_5) &= l_{6\text{-}11} \wedge \overline{c_{11}} \wedge \overline{a_6} \wedge \overline{l_{1\text{-}11}} \wedge \overline{l_{11\text{-}1}} \wedge \overline{l_{11\text{-}6}}, \\ \Phi(R_6) &= l_{11\text{-}1} \wedge \overline{c_{11}} \wedge \overline{a_6} \wedge \overline{l_{1\text{-}11}} \wedge \overline{l_{11\text{-}6}} \wedge \overline{l_{6\text{-}11}}. \end{split}$$

В представленных функциях член минимальной длины, если в функции  $\Phi(R_l)$  их несколько, или единственный член определяет диагноз, соответствующий синдрому  $R_l$ , в котором правильно определяется неисправный компонент, исправные компоненты и компоненты, состояние которых осталось не идентифицированным на данном синдроме.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена организация диагностирования одиночных неисправных компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного



графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами. Она основана на совместном использовании единого теста контроля работоспособности и 14 подмножеств из четырех дополнительных проверок. Каждое подмножество предназначено для диагностирования одного неисправного компонента из состава каждой «неисправной» подсистемы.

Предложен вариант построения подмножества диагностических проверок, обеспечивающих требуемую точность диагностирования. Для обеспечения такой точности в состав каждой из дополнительных проверок должны входить только некоторые из компонентов «неисправной» подсистемы. Особенностями предложенного варианта являются:

- различие синдромов проверки неисправных компонентов любой «неисправной» подсистемы;
- единообразие синдромов проверки компонентов с одинаковыми номерами, входящих в любую «неисправную» подсистему.

Эти особенности упрощают дешифрацию синдрома проверки, полученного для конкретной «неисправной» подсистемы, которая сводится к его сравнению с шестью возможными синдромами, одинаковыми для любой диагностируемой подсистемы. При совпадении полученного синдрома с одним из шести возможных, показанных в табл. 4, неисправным считается компонент с номером, равным номеру совпавшего синдрома. При несовпадении предлагается продолжить выполнение проверок, оставшихся в таблице тестов контроля работоспособности, до обнаружения еще одной «неисправной» подсистемы, с которой выполнить те же действия, что и для ранее обнаруженной подсистемы. Новый диагноз передается через диагностический монитор обслуживающему персоналу для принятия более обоснованного решения об идентификации неисправного компонента.

Приведен пример дешифрации результатов дополнительных проверок с использованием алгебрологического метода.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. *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 26.10.2015).
- 2. *Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С.* Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блоксхем) // Автоматика и телемеханика. 2009. № 2. С. 153—170.
- 3. *Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С.* Простые методы построения квазиполносвязных графов (симметричных блок-схем) // Сб. тр. IV междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления PACO`2008 / ИПУ РАН. М., 2008.
- Alverson B., Roweth D., Kaplan L. Cray XCR Series Network. 28 p. — URL: http://www.cray.com/Assets/PDF/products/xc/ CrayXC30Networking.pdf (дата обращения 26.10.2015).
- Alverson R., Roweth D., Kaplan L. The Gemini System Interconnect // 18<sup>th</sup> IEEE Symposium on High Performance Interconnects on 2010. — P. 83—87. — URL: http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/HOTI.2010.23 (дата обращения 26.10.2015).
- 6. Ведешенков В.А., Курако Е.А., Лебедев В.Н. О диагностировании цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера  $7 \times 7$  // Проблемы управления. 2014. № 6. С. 68—76.
- 7. Ведешенков В.А. Алгебро-логический метод дешифрации результатов тестирования цифровых систем // Сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы образования и науки» / ООО «Консалтинговая компания Юком». Тамбов, 2014. Ч. 2. С. 33—36.

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

Ведешенков Виктор Алексеевич — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ⋈ vva@ipu.ru.

#### Читайте в ближайших номерах

- ✓ Белов М.В. Математическое моделирование жизненных циклов сложных социально-экономических и бизнес-систем
- ✓ Горбанева О.И., Угольницкий Г.А. Учет коррупции в моделях сочетания общественных и частных интересов в иерархических системах управления
- ✓ **Еремин Е.Л., Шеленок Е.А.** Комбинированная адаптивная система управления структурно и параметрически неопределенным нелинейным объектом
- ✓ Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю., Павлов Б.В. Аэромагнитная градиентометрия и ее применение в навигации
- Кулинич А.А. Семиотические когнитивные карты. Ч. 2. Основные определения и алгоритмы



### КИБЕРНЕТИКА 2.0

#### **П.А.** Новиков

Кратко рассмотрена эволюция кибернетики, введен в рассмотрение новый этап ее развития — «кибернетика 2.0» как наука об (общих закономерностях) организации систем и управлении ими. Обоснована актуальность развития нового раздела кибернетики — «теории Организации» (или  $O^3$ ), исследующей организацию как свойство, процесс и систему.

Ключевые слова: кибернетика, система, организация, управление.

#### ВВЕДЕНИЕ: КИБЕРНЕТИКА Н. ВИНЕРА

Рассмотрим кратко историю кибернетики и опишем, что сегодня входит в «классическую» кибернетику (условно ее можно назвать  $\kappa$ ибернетикой 1.0).

В Древней Греции термин «кибернетика» употреблялся для обозначения искусства государственного деятеля, управляющего городом (например, в «Законах» Платона).

В своей классификации наук А. Ампер (1834) относил кибернетику (как «науку управления вообще») к политическим наукам — в своей книге «Опыт философских наук» кибернетику он определил как науку о текущей политике и практическом управлении государством (обществом) [1, 2].

Б.Ф. Трентовский (1843) определял ее как «искусство управления народом» [3, 4].

А.А. Богданов в своей «Тектологии» (1925) исследовал организационные принципы, общие для всех видов систем [5].

Термин кибернетика (от др.-греч. κυβερνητική — «искусство кормчего», κυβερνη — административная единица; объект управления, содержащий людей в современном, ставшем хрестоматийным, понимании — как «наука об управлении и связи в животном и машине» — впервые был предложен Норбертом Винером в 1948 г. (см. его одноименную пионерскую монографию [6]). Далее Винер добавил (1950) к объектам, изучаемым кибернетикой, и

общество [7]. Классиками первых лет развития кибернетики, помимо Н. Винера, являются *Уильям Эшби*<sup>2</sup> [8] (1956) и *Стаффорд Бир* [9] (1959), сделавших акценты, соответственно, на биологических и экономических ее аспектах.

Кибернетика изучает такие концепты, как управление и коммуникация в живых организмах, машинах и организациях, включая самоорганизацию. Она фокусирует внимание на том, как система (цифровая, механическая или биологическая) обрабатывает информацию, реагирует на нее и изменяется или может быть изменена, чтобы лучше выполнять свои функции (в том числе по управлению и коммуникации).

С историей возникновения и развития кибернетики в мире и в СССР (а затем — в России) можно ознакомиться по работам [10-15].

Кибернетика — междисциплинарная наука. Она возникла «на стыке» математики, логики, семиотики, физиологии, биологии, социологии. Ей присущ анализ и выявление общих принципов и подходов в процессе научного познания. Наиболее весомыми теориями, условно объединяемыми кибернетикой 1.0, можно считать теорию управления, теорию связи, исследование операций и др. (рис. 1).

Таким образом, кибернетику 1.0 (или просто кибернетику) можно определять как науку об управлении и обработке информации в животном, машине и обществе. Альтернативой служит опре-

 $<sup>^1</sup>$  От этого корня происходят слова «government», «губернатор», «губерния», «гувернер».

 $<sup>^2</sup>$  У. Эшби, кроме того, принадлежат введение и исследование категорий «разнообразие» и «самоорганизация», а также первое употребление в кибернетике терминов «гомеостат» и «черный ящик».



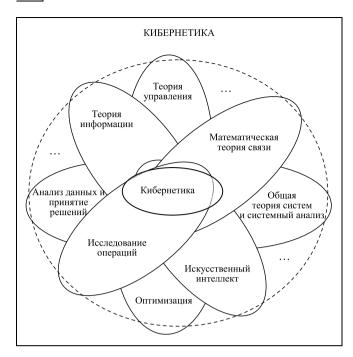


Рис. 1. Состав и структура кибернетики

деление Кибернетики (с большой буквы, чтобы там, где это существенно, отличать ее от кибернетики) как науки об общих закономерностях управления и обработки информации в животном, машине и обществе. Различие определений, заключающееся в добавлении во втором случае «общих закономерностей», очень существенно и не раз будет подчеркиваться и использоваться далее. В первом случае речь идет о «зонтичном бренде», т. е. об «объединении» результатов всех наук, занимающихся исследованием проблем управления и обработки информации в животном, машине и обществе, а во втором случае, условно говоря, - о частичном «пересечении» этих результатов<sup>3</sup> (см. также рис. 1), т. е. тех из них, которые являются общими для всех наук-компонентов.

Сегодня к кибернетике относят (перечисление в порядке убывания условной степени принадлежности — см. также рис. 1, у ряда направлений приведен соответствующий «год рождения»):

- теорию управления  $^4$  (1868 статьи Д. Максвелла и И.А. Вышнеградского [16, 17]);
- математическую теорию связи и информации (1948 работы К. Шеннона [18]);

- общую теорию систем, системотехнику и системный анализ $^5$  (1968 книга [19] и, соответственно, 1956 книга [20]);
- оптимизацию (в том числе линейное и нелинейное программирование, динамическое программирование, оптимальное управление, нечеткую оптимизацию, дискретную оптимизацию, генетические алгоритмы и др.);
- исследование операций (теорию игр и статистических решений и др.);
- искусственный интеллект (1956 Дартмутский семинар);
  - анализ данных и принятие решений;
  - робототехнику

и другие (далее последовательность перечисления, охватывающего как чисто математические, так и прикладные науки и научные направления, произвольна), включая системотехнику, распознавание, искусственные нейронные сети и нейрокомпьютеры, эргатические системы, «нечеткие» системы (в том числе rough sets, grey systems), теорию идентификации, теорию алгоритмов, теорию расписаний и массового обслуживания, математическую лингвистику, теорию программирования, синергетику и пр., и пр.

Кибернетика существенно пересекается по своим составляющим со многими другими науками, в первую очередь — с такими метанауками, как общая теория систем, системный анализ и *информа* $mu\kappa a^6$ .

Классические монографии и учебники по Кибернетике с ее «собственными» результатами очень немногочисленны — см. [6—9, 19, 21—28], а учебники по кибернетике (интересно отметить, что выходили они, преимущественно, в СССР) обычно включают в себя многие из перечисленных направлений (в основном, относящиеся к управлению техническими системами и к информатике) — см. [29—34].

Отметим также, что приставка «кибер-» регулярно порождает новые термины: киберсистема, киберпространство, киберугроза, кибербезопасность и т. д. Если посмотреть еще более широко, то эта приставка охватывает все, связанное с автоматизацией, компьютерами, виртуальной реальностью, Интернетом и др.<sup>7</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Образно говоря — стержне «зонтика».

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Науку управления далее иногда будем называть, следуя устоявшейся в ней традиции, теорией управления (осознавая, что название у́же предмета).

 $<sup>^{5}</sup>$  Более подробно речь об истории этих направлений идет в работе [35].

 $<sup>^{6}</sup>$  И даже шире — с компьютерными науками (Computer Sciences).

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Наверное, это дань отражению слова «кибернетика» в массовом общественном сознании, даже если профессионалы в данной области не вполне согласны с таким (очень широким и упрощенным) употреблением этой приставки.



Наряду с общей кибернетикой выделяют и специальные кибернетики [33]. Самым естественным (следующим из расширенного определения Н. Винера) является выделение, помимо теоретической кибернетики (т. е. Кибернетики), трех базовых кибернетик: технической, биологической и социально-экономической. Возможно и более полное перечисление (в порядке убывания полноты исследованности; см. ссылки в работе [35]): техническая кибернетика, биологическая и медицинская кибернетика (включая эволюционную кибернетику), экономическая кибернетика, физическая кибернетика (точнее — кибернетическая физика [36, 37]), социальная кибернетика, педагогическая кибернетика, квантовая кибернетика, космическая кибернетика.

Отдельно, наверное, стоит выделить такую ветвь биологической кибернетики, как кибернетические модели мозга, которая сегодня тесно интегрирована с искусственным интеллектом, нейро- и когнитивными науками. Романтическая идея создать кибернетический (компьютерный) мозг, хотя бы отчасти похожий на естественный, стимулировала как отцов-основателей кибернетики (см. работы У. Эшби [38], Г. Уолтера [39], М. Арбиба [40], Ф. Джоржа [41], К. Штейнбуха [42] и др.), так и их последователей (современный обзор можно найти в работе [43]).

### 1. КИБЕРНЕТИКА КИБЕРНЕТИКИ И ДРУГИЕ «КИБЕРНЕТИКИ»

Помимо классической винеровской кибернетики за последние более чем полвека появились и другие «кибернетики», явно декларирующие как свою связь с первой, так и стремление ее развить.

Наиболее ярким явлением, несомненно, стала кибернетика второго порядка (кибернетика кибернетики, Second Order Cybernetics, метакибернетика, новая кибернетика; «порядок» условно говоря, соответствует «рангу рефлексии») — кибернетика кибернетических систем, которая связана, в первую очередь, с именами М. Мид, Г. Бейтсона и Г. Ферстера и делает акцент на роли субъекта/наблюдателя, осуществляющего управление<sup>8</sup> [47—51].

«Биологический» этап кибернетики второго порядка связан с именами У. Матураны и Ф. Варелы [52—54] и введенным ими понятием *аутопоезиса* (самопорождения и саморазвития систем). Как отмечал Ф. Варела: «Кибернетика первого порядка — это кибернетика наблюдаемых систем. Киберне-

тика второго порядка — кибернетика наблюдающих систем.». В последней акцент делается на обратной связи между управляемой системой и наблюдателем.

Встречаются термины кибернетика третьего порядка (социальный аутопоезис; кибернетика второго порядка, учитывающая авторефлексию), кибернетика четвертого порядка (кибернетика третьего порядка, учитывающая ценности исследователя), но эти термины концептуальные и еще не получили устоявшихся значений (см., например, обсуждение в работах [19, 55—61]):

- гомеостатика (Ю.Г. Горский и его научная школа), исследующая процессы управления противоречиями ради поддержания постоянства процессов, функций, траекторий развития и др. [62, 63];
- неокибернетика (Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов) междисциплинарная наука, ориентированная на разработку методологии постановки и решения проблем анализа и синтеза интеллектуальных процессов и систем управления сложными объектами произвольной природы [64, 65];
  - неокибернетика (С.М. Крылов) [66];
- новая кибернетика, посткибернетика (Г.С. Теслер) фундаментальная наука об общих законах и моделях информационного взаимодействия и влияния в процессах и явлениях, протекающих в живой, неживой и искусственной природе [67]. Отметим, что за 20 лет до Г.С. Теслера почти такое же определение К.К. Колин дал информатике [68];
- эвергетика (В.А. Виттих) ценностно-ориентированная наука о процессах управления в обществе, объектом которой служит ситуация, осознаваемая как проблемная группой неоднородных акторов, имеющих различные точки зрения, интересы и ценностные предпочтения [69].
- субъектно-ориентированное управление в ноосфере «Hi-Hume Cybernetics» (В.А. Харитонов, А.О. Алексеев), акцентирующее внимание на субъектности и субъективности управления [70].

Можно предложить понятие кибернетики пятого порядка [35], как кибернетики четвертого порядка, которая учитывает взаимную рефлексию субъектов управления [46], принимающих согласованные решения, и т. д.

Наблюдаемое разнообразие подходов, каждый из которых явно или неявно претендует на новый мейнстрим развития классической кибернетики, вполне естественно, так как отражает эволюцию науки кибернетики. Со временем часть из подходов разовьется, часть объединится с другими, часть остановится в своем развитии. Естественно, хотелось бы видеть общую картину, интегрирующую и взаимно позиционирующую все перечисленные подходы или большинство из них.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Такой подход был и остается вполне традиционным для теории управления организационными системами (см., например, [44—46]).



#### 2. КИБЕРНЕТИКА 2.0

Выше и в работе [35] кратко рассмотрены история кибернетики, ее современное состояние, тренды и перспективы развития ряда составляющих ее наук (в основном — теории управления). А как обстоит дело с перспективами собственно кибернетики? Для этого обратимся к первоистокам — исходному определению кибернетики как науки об управлении и связи.

С управлением все относительно понятно, со связью, на первый взгляд, тоже — в 1940-х гг. появилась (в том числе усилиями самого Н. Винера) математическая теория связи и информации (модели определения количества информации, пропускных способностей каналов связи, затем интенсивно начала развиваться теория кодирования и т. д.).

Но посмотрим на связь немного шире. У Н. Винера и в статье [71], и в исходной книге [6] в явном или неявном виде фигурируют целесообразность и каузальность (причинно-следственные связи: действительно, для осуществления обратной связи, управление-следствие определяется причиной — состоянием управляемой системы; управляющее воздействие на входе управляемой системы вызвано причиной — состоянием системы управления и т. д.). Конечно, важно по каким каналам связи и как именно передается информация, но все это вторично, если речь идет о закономерностях, универсальных для животного, машины и общества.

Еще более широкий взгляд — трактовка связи как взаимосвязи — между элементами управляемой системы, между управляющей и управляемой системой и т. д., включая различные виды воздействий и взаимодействий (материальных, информационных и пр.). При этом «взаимосвязь» по отношению к «связи» более является общей категорией.

Взаимосвязям (в общесистемном виде) соответствует категория *организации* (см. определение и обсуждение далее). Поэтому, если сделать простую коррекцию — заменить в винеровском определении кибернетики «связь» на «организацию», то получим современное определение кибернетики: «наука об организации систем и управлении ими», которую назовем условно «кибернетикой 2.0».

Заменяя в определении кибернетики «связь» на более емкую категорию «организация», мы тем

<sup>9</sup> В словаре С.И. Ожегова связь определяется как отношение взаимной зависимости, обусловленности, общности между чем-нибуль

самым несколько дистанцируемся от информатики. Поэтому рассмотрим кратко обоснованность и последствия этого дистанцирования.

**Кибернетика и информатика**. Сегодня и кибернетика, и информатика представляют собой самостоятельные междисциплинарные фундаментальные науки [72, 73]. По образному выражению Б.В. Соколова и Р.М. Юсупова [64], информатика и кибернетика — «сиамские близнецы», однако в природе сиамские близнецы все-таки являются патологией <sup>10</sup>.

Кибернетика и информатика сильно пересекаются (в том числе на уровне общей научной базы — статистической теории информации<sup>11</sup> [73]). Но акценты у них сильно различны. Если фундаментальные идеи кибернетики — это винеровские «управление и связь в животных и машине», то фундаментальные идеи информатики — это формализация (в теории) и компьютеризация (на практике). Соответственно, если базовой математической основой кибернетики служат теория управления и теория информации, то соответствующей основой информатики является теория алгоритмов и формальных систем<sup>12</sup>.

Предмет современной информатики (или даже зонтичного бренда *информационных наук*), охватывающей сегодня и компьютерные, и информационные направления (в зарубежной терминологии — Information Science, Computer Science и Computational Science [74]), — информационные процессы.

Действительно, с одной стороны, обработка информации в широком смысле нужна всюду (!), а не только в управлении и/или в процессе организации. С другой стороны, информационные процессы и соответствующие информационные и коммуникационные технологии уже настолько

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Определение кибернетики, например, как «объединения» общих законов информатики и управления породит меганауку, лишенную конкретного содержания и обреченную на вечное нахождение на концептуальном уровне.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Отметим, что математическая (статистическая) теория связи и информации оперирует количественными оценками информации. Существенных продвижений в формулировке методов оценки содержательной (семантической) ценности информации, к сожалению, достигнуто не было, и эта задача продолжает оставаться одним из глобальных вызовов информатике.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Это различие отчасти оправдывает то, что некоторые науки, которые принято относить к информатике (за рубежом — к Computer Sciences), не нашли отражения в настоящей работе: теория формальных языков и грамматик, «настоящий» искусственный интеллект (не искусственные нейронные сети, которые сегодня являются эмпирической инженерной наукой, а инженерия знаний, формализация рассуждений, планирование поведения и т. д.), теория автоматов, теория вычислительной сложности и т. д.



интегрированы в процессы управления<sup>13</sup>, что разделить их почти невозможно, и тесное взаимодействие информатики и кибернетики на частном операциональном уровне будет продолжаться и расширяться.

**Организация и теория Организации.** В соответствии с определением, данным в Философском энциклопедическом словаре, *организация* — это:

- 1) внутренняя упорядоченность, согласованность взаимодействия более или менее дифференцированных и автономных частей целого, обусловленная его строением;
- 2) совокупность процессов или действий, ведущих к образованию и совершенствованию взаимосвязей между частями целого;
- 3) объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил.

В настоящей работе мы используем понятие *организация* в первом и во втором его значениях, т. е. как процесс (второе значение) и как результат этого процесса (первое значение) организации. Третье значение (организационная система) — как класс объектов управления — используется в теории управления *организационными системами* [44, 45].

На дескриптивном (феноменологическом) и объяснительном уровне «организация системы» отражает, соответственно, как и почему именно так организована система (организация как свойство); на нормативном уровне — как она должна быть организована (требования к свойству организацию) и как ее следует организовывать (требования к процессу организации).

Научное направление, которое было бы призвано исследовать ответы на поставленные вопросы (его логично называть *теория Организации*  $^{14}$ , или  $O^3$  (организация как свойство, процесс и система) — по аналогии с  $C^3$  — см. [35]), сегодня почти не развито, хотя понятно, что оно тесно связано и отчасти пересекается с общей теорией систем и системным анализом (которые занимаются, в основном, проблемами дескриптивного уровня, поч-

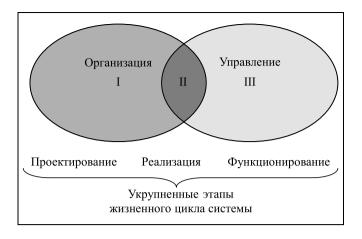


Рис. 2. Организация и управление

ти не обращаясь к нормативному), а также с методологией (как общим учением об организации деятельности [75], в том числе — управленческой деятельности [76]). Создание полноценной теории Организации является актуальной задачей кибернетики!

Рассмотрим, как соотносятся две базовых категории «организация» и «управление», фигурирующие в определении кибернетики 2.0.

Управление в Философском энциклопедическом словаре определяется как «элемент, функция организованных систем различной природы: биологических, социальных, технических, обеспечивающая сохранение их определенной структуры, поддержание режима деятельности, реализацию программы, цели деятельности». Управление — «воздействие на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения» [45, c. 9], т. е., категории организации и управления пересекаются, но не совпадают. Можно считать, что первое соответствует проектированию, дизайну системы, второе — ее функционированию 15, а совместно они реализуются на этапах реализации и адаптации системы (рис. 2). Другими словами, организация (стратегический контур) «предшествует» управлению (тактический контур).

Приведем примеры содержания областей I—III, представленных на рис. 2.

I. Дизайн (проектирование, включая состав, структуру и функции) систем — организация, но не управление (хотя в теории управления организационными системами есть управление составом и управление структурой системы).

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Н. Винер считал, что процессы управления — это, в первую очередь, информационные процессы — получение, обработка и передача информации.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Отметим, что параллельно существует одноименное научное направление «теория организации», являющееся, условно говоря, и по своему предмету (организационные системы), и по используемым методам разделом менеджмента. К сожалению, многочисленные учебники (а монографий по этому научному направлению почти нет) во введениях содержат краткие общие слова о свойстве и процессе организации, но затем все их содержание посвящено организационным системам — менеджменту организаций.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Условная аналогия: организации соответствует «деизм» (создатель системы не вмешивается в ее функционирование), а управлению — «теизм» (участие создателя системы в текущем ее функционировании).



II. Совместный дизайн системы и объекта управления. Адаптация. Настройка механизмов управления.

III. Функционирование регуляторов в технических системах — управление, но не организация.

Возможно «иерархическое» соотношение организации и управления <sup>16</sup>, так как, с одной стороны, процесс управления требует организации (организация, например, является одним из этапов управленческого цикла А. Файоля и одной из функций организационного управления [44]). С другой стороны, процессом организации (например, жизненным циклом системы), в свою очередь, можно и нужно управлять.

С усложнением создаваемых человечеством систем процессу и свойству организации уделяется, и будет уделяться в дальнейшем, все большее внимание. Действительно, управление стандартными объектами (например, разработка регуляторов для технических и/или производственных систем) становится в большей степени ремеслом, чем наукой, а на первый план выходит стандартизация технологий организации деятельности, управления созданием новых технологий деятельности и т. д., т. е. инженерия систем деятельностии.

Успешное сочетание (в рамках кибернетики 2.0) организации и управления позволит обоснованно и эффективно отвечать на главный вопрос инженерии систем деятельности о том, как строить системы управления ими («рефлексивный» вопрос, относящийся к кибернетике второго или более высоких порядков) — человечеству необходимо научиться проектировать и реализовывать системы управления сложными системами (высокотехнологичным производством, жизненным циклом продукции, организациями, регионами и т. д.) так же, как уже научились в инженерии эффективно проектировать материальные объекты (технические и подобные им системы).

**Кибернетика 2.0.** Тесная связь кибернетики с общей теорией систем и системным анализом, а также все возрастающая роль технологий позволяют предположить, что кибернетика 2.0 должна включать в себя *кибернетику* (как винеровскую, так и кибернетики более высоких порядков — см. выше), Кибернетику, а также *общую теорию сис*-

*тем* и *системный анализ* с результатами в следующих формах [35]:

- общие законы, закономерности и принципы, исследуемые в рамках метанаук *Кибернетика* и *Системный анализ*:
- совокупность результатов наук-компонентов («зонтичные бренды» кибернетика и системные исследования, объединяющие соответствующие науки);
- принципы разработки соответствующих технологий.

Ключевые слова для кибернетики 2.0: управление, организация, система. Для кибернетики 2.0 можно выделить, как и для кибернетики (см. выше), концептуальное ядро, которое по аналогии назовем Кибернетикой 2.0 с большой буквы.

На концептуальном уровне Кибернетику 2.0 составляют (рис. 3): философия управления (включая общие законы, закономерности и принципы управления), методология управления, теория Организации (включая общие законы, закономерности и принципы функционирования сложных систем, а также разработки и выбора общих технологий). Базовыми науками для кибернетики 2.0 служат теория управления, общая теория систем и системный анализ, а также системная инженерия.

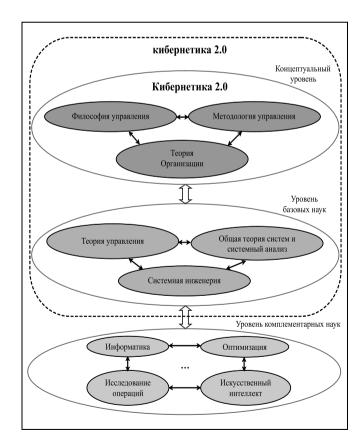


Рис. 3. Состав и структура кибернетики 2.0

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Вообще, соотношение организации и управления очень нетривиально и требует дальнейшего осмысления. Например, в мультиагентных системах децентрализованное управление, заключающееся в выборе законов и правил взаимодействия автономных агентов, может рассматриваться как организация. Другой пример — Библия как инструмент организации [77] (создание системы норм, которая стала общим знанием и во многом определяла институциональное управление обществом).



Комплементарными науками для кибернетики 2.0 являются информатика, оптимизация, исследование операций и искусственный интеллект (см. рис. 3).

Отметим, что представленная на рис. 3 общая архитектура кибернетики 2.0 может проецироваться на различные предметные области и отрасли наук-предмета в зависимости от класса рассматриваемых систем (технические, биологические, социальные и др.).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ПЕРСПЕКТИВЫ «КИБЕРНЕТИКИ 2.0»

Перечислим альтернативные сценарии дальнейшего развития кибернетики:

- негативистский сценарий, при котором все более доминирует мнение, что «кибернетики не существует», и она все более предается забвению;
- «зонтичный» сценарий кибернетика рассматривается, с отданием должного прошлым заслугам, как «механистическое» (неэмерджентное) объединение, а прогноз ее развития определяется как совокупность трендов развития, базовых и комплементарных наук, охватываемых «зонтичным брендом» кибернетики;
- «философский» сценарий, в рамках которого корпус новых результатов кибернетики 2.0 составляют только концептуальные рассуждения (развитие концептуального уровня);
- предметный (отраслевой) сценарий, в рамках которого основные результаты получаются на стыке с отраслевыми приложениями;
- конструктивно-оптимистический (желательный) сценарий, который заключается в том, что происходят сбалансированное развитие базовых, комплементарных и «концептуальных» наук, сопровождаемое конвергенцией и междисциплинарной трансляцией их общих результатов, а также основывающаяся на этом генерация обобщений концептуального уровня.

Актуальными представляются следующие классы задач управления:

- сетецентрические системы (включая как военные приложения, так и сетевые и облачные производства);
- информационное управление и кибербезопасность;
- управление жизненным циклом сложных организационно-технических систем;
  - инженерия систем деятельности.

Перспективные области приложений: живые системы, социальные системы, «микро-» системы, энергетика и транспорт.

Основные задачи Кибернетики 2.0:

- обеспечение междисциплинарности исследований (по отношению к базовым и комплементарным наукам см. рис. 3);
- поиск, систематизация и исследование в рамках «философии управления» общих законов, закономерностей и принципов управления системами различной природы;
- создание и развитие теории Организации  $(O^3)$ .

Можно выделить (см. также [35]) ряд глобальных вызовов (т. е. явлений, которые уже наблюдаются, но не укладываются полностью в рамки кибернетики 1.0), на которые должна ответить кибернетика 2.0:

- вавилонская башня науки (междисциплинарность, дифференциация наук; в первую очередь, в контексте кибернетики наук об управлении и смежных с ними);
- крах централизации (децентрализация и сетевизм, включая системы систем, распределенную оптимизацию, эмерджентный интеллект, мультиагентные системы и др.);
- стратегическое поведение (во всех его проявлениях, включая несогласованность интересов, целеполагание, рефлексию и др.);
- проклятие сложности (включая все аспекты сложности и нелинейности <sup>17</sup> современных систем, а также «проклятие размерности» большие данные и большое управление).

В заключение подчеркнем, что последующее развитие кибернетики 2.0 потребует еще немало совместных усилий математиков, философов, специалистов по теории управления, системному инжинирингу и многих других.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Поваров Г.Н.* Ампер и кибернетика. М.: Сов. радио, 1977. 96 с
- 2. *Ampère A.-M.* Essai sur la philosophie des sciences. Paris: Chez Bachelier, 1843. P. 140—142.
- 3. *Моисеев Н.Н.* Люди и кибернетика. М.: Молодая гвардия, 1984. 224 с.
- 4. *Trentowski B.* Stosunek Filozofii do Cybernetyki, Czyli Sztuki Rz№dzenia Narodem. Warsawa, 1843. 195 s.
- Богданов А.А. Всеобщая организационная наука: в 2 т. М.: Экономика, 1989. — Т. 1. — 304 с.; Т. 2. — 351 с.
- Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. — М.: Наука, 1983. — 338 с. / Wiener N. Cybernetics: or the Control and Communication in the Animal and the Machine. — Cambridge: The Technology, 1948. — 194 p.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Можно образно сказать, что в этом смысле кибернетика 2.0 должна включать в себя «нелинейную теорию автоматического управления», исследующую нелинейные децентрализованные объекты управления с нелинейными наблюдателями и др.

- \$
- 7. *Винер Н.* Кибернетика и общество. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 200 с. / *Wiener N*. The Human Use of Human Beings; Cybernetics and Society. Boston: Houghton Mifflin Company, 1950. 200 р.
- Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М.: Мир, 1966. 432 с. / Ashby W. An Introduction to Cybernetics. — London: Chapman and Hall, 1956. — 295 p.
- Бир С. Кибернетика и управление производством. М.: Наука, 1965. — 391 с. / Beer S. Cybernetics and Management. — London: The English University Press, 1959. — 214 р.
- Из истории кибернетики / Ред.-сост. Я.И. Фет. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2006. — 339 с.
- История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде). Вып. 1: Яркие фрагменты истории / Под общ. ред. чл.-корр. РАН Р.М. Юсупова; сост. М.А. Вус; Ин-т информатики и автоматизации РАН. — СПб.: Наука, 2008. — 356 с.
- 12. *Хрестоматия* по истории информатики / Автор-сост. Я.И. Фет; отв. ред. Б.Г. Михайленко; Ин-т выч. матем. и математ. геофизики СО РАН. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 559 с.
- 13. *Gerovich S.* From Newspeak to Cyberspeak: A History of Soviet Cybernetics. Cambridge: MIT Press, 2002. 383 p.
- Peters B. Normalizing Soviet Cybernetics // Information & Culture: A Journal of History. 2012. Vol. 47, N 2. P. 145—175.
- Umpleby S. A Brief History of Cybernetics in the United States // Austrian Journal of Contemporary History. — 2008. — Vol. 19, N 4. — P. 28—40.
- Вышнеградский И.А. О регуляторах прямого действия // Известия СПб. практического технологического института. — 1877. — Т. 1. — С. 21—62.
- 17. Maxwell J.C. On Governors // Proc. of the Royal Society of London. 1868. Vol. 16. P. 270—283.
- Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 832 с. / Shannon C., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Illinois: University of Illinois Press, 1948. 144 р.; Shannon C.A. Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379—423, 623—656.
- 19. Bertalanffy L. General System Theory: Foundations, Development Applications N Y: George Braziller 1968 296 p.
- ment, Applications. N.-Y.: George Braziller, 1968. 296 p. 20. *Kahn H., Mann I.* Techniques of Systems Analysis. Santa Monica: RAND Corporation, 1956. 168 p.
- 21. Акофф Р., Эмери М. О целеустремленных системах. М.: Сов. радио, 1974. 272 с. / Ackoff R., Emery F. On Purposeful Systems: An Interdisciplinary Analysis of Individual and Social Behavior as a System of Purposeful Events. 2nd ed. N.-Y.: Aldine Transaction, 2005. 303 p.
- 22. *Бир С.* Мозг фирмы. М.: Радио и связь, 1993. 416 с. / *Beer S.* Brain of the Firm: A Development in Management Cybernetics. London: Herder and Herder, 1972. 319 p.
- Винер Н. Бывший вундеркинд. Ижевск: РХД, 2001. 272 с. / Wiener N. Ex-Prodigy: My Childhood and Youth. — Cambridge: The MIT Press, 1964. — 317 р.
- 24. Винер Н. Творец и робот. М.: Прогресс, 1966. 104 с. / Wiener N. God and Golem, Inc.: A Comment on Certain Points where Cybernetics Impinges on Religion. Cambridge: The MIT Press, 1966. 99 р.
- 25. Винер Н. Я математик. Ижевск: РХД, 2001. 336 с. / Wiener N. I Am Mathematician. Cambridge: The MIT Press, 1964. 380 p.
- 26. Джордж Ф. Основы кибернетики. М.: Радио и связь, 1984. 272 с. / George F. The Foundations of Cybernetics. London: Gordon and Breach Science Publisher, 1977. 286 р.
- 27. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с. / *Mesarović M., Mako D., Takahara Y.* Theory of Hierarchical Multilevel Systems. N.-Y.: Academic, 1970. 294 р.
- 28. George F.H. Philosophical Foundations of Cybernetics. Kent: Abacus Press, 1979. 157 p.
- Глушков В.М. Введение в кибернетику. Киев: Изд-во Академии наук УССР, 1964. — 324 с.

- Дружинин В.В., Конторов Д.С. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
- Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии. М.: Сов. радио, 1976. — 295 с.
- 32. *Коршунов Ю.М.* Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 496 с.
- 33. *Кузин Л.Т.* Основы кибернетики: в 2 т. М.: Энергия, 1979. Т. 1. 504 с.; Т. 2. 584 с.
- 34. *Лернер А.Я.* Начала кибернетики. М.: Наука, 1967. 400 с. / *Lerner A.* Fundamentals of Cybernetics. Berlin: Springer, 1972. 294 р.
- Новиков Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. М.: ЛЕНАНД, 2016. 160 с.
- 36. *Турчин В.Ф.* Феномен науки: Кибернетический подход к эволюции. М.: Наука, 1993. 296 с. / *Turchin V*. The Phenomenon of Science. N.-Y.: Columbia University Press, 1977. 348 p.
- 37. *Фрадков А.Л.* Кибернетическая физика. СПб.: Наука, 2004. 208 с. / *Fradkov A.* Cybernetical Physics: From Control of Chaos to Quantum Control (Understanding Complex Systems). Berlin: Springer, 2006. 236 р.
- 38. *Эшби У.Р.* Конструкция мозга. М.: ИЛ, 1962. 399 с. / Ashby W. Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior. N.-Y.: John Wiley & Sons, 1952. 298 p.
- 39. Уолтер Г. Живой мозг. М.: Мир, 1970. 300 с. / Walter G. The Living Brain. London: Pelican Books, 1963. 255 р. 40. Арбиб М. Метафорический мозг. М.: Мир, 1976. —
- 40. *Арбиб М.* Метафорический мозг. М.: Мир, 1976. 296 с. / *Arbib M.* The Metaphorical Brain: An Introduction to Cybernetics as Artificial Intelligence and Brain Theory. N.-Y.: Wiley, 1972. 384 р.
- 41. Джордж Ф. Мозг как вычислительная машина. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 528 с. / George F. The Brain as a Computer. N.-Y.: Pergamon Press, 1962. 437 p.
- 42. Штейнбух К. Автомат и человек. М.: Сов. радио, 1967. 494 с. / Steinbuch K. Automat und Mensch. Kybernetische Tatsachen und Hypothesen. Berlin: Springer-Verlag, 1963. 392 р
- 43. Pickering A. The Cybernetic Brain. Chicago: The University of Chicago Press, 2010. 537 р.
   44. Механизмы управления / Под ред. Д.А. Новикова. М.:
- 44. *Механизмы* управления / Под ред. Д.А. Новикова. М.: Ленанд, 2011. 192 с. / Mechanism Design and Management: Mathematical Methods for Smart Organizations / Ed. by Prof. D. Novikov. N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013. 163 р.
- 45. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. 3-е изд. М.: Физматлит, 2012. 604 с. / *Novikov D.* Theory of Control in Organizations. N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013. 341 р.
- Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2013. — 412 с. / Novikov D., Chkhartishvili A. Reflexion and Control: Mathematical Models. — London: CRC Press, 2014. — 298 p.
- 47. *Bateson G.* Steps to an Ecology of Mind. San Francisco: Chandler Pub. Co., 1972. 542 p.
- 48. Foerster H. The Cybernetics of Cybernetics. 2nd ed. Minneapolis: Future Systems, 1995. 228 p.
- 49. *Foerster H*. Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition. N.-Y.: Springer-Verlag, 2003. 362 p.
- Heylighen F., Joslyn C. Cybernetics and Second-Order Cybernetics / Encyclopedia of Physical Science & Technology.
   3rd ed. N.-Y.: Academic Press, 2001. P. 155—170.
- Mead M. The Cybernetics of Cybernetics / Purposive Systems.
   Ed. by H. von Foerster, et al. N.-Y.: Spartan Books, 1968. P. 1—11.
- Maturana H., Varela F. Autopoiesis and Cognition. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1980. 143 p.
- 53. *Maturana H., Varela F.* The Tree of Knowledge. Boston Shambhala Publications, 1987. 231 p.
- 54. *Varela F.* A Calculus for Self-reference // Intern. Journal of General Systems. 1975. Vol. 2. P. 5—24.
- 55. Лепский В.Е. Философия и методология управления в контексте развития научной рациональности // Тр. XII Все-



- росс. совещания по проблемам управления / ИПУ РАН. М., 2014. С. 7785—7796.
- 56. Boxer P., Kenny V. Lacan and Maturana: Constructivist origins for a 3<sup>0</sup> Cybernetics // Communication and Cognition. 1992. Vol. 25, N 1. P. 73—100.
- Kenny V. There's Nothing Like the Real Thing. Revisiting the Need for a Third-Order Cybernetics // Constructivist Foundations. — 2009. — N 4 (2). — P. 100—111.
- 58. *Mancilla R*. Introduction to Sociocybernetics (Part 1): Third Order Cybernetics and a Basic Framework for Society // Journal of Sociocybernetics. 2011. Vol. 42, N 9. P. 35—56.
- Mancilla R. Introduction to Sociocybernetics (Part 3): Fourth Order Cybernetics // Journal of Sociocybernetics. — 2013. — Vol. 44, N 11. — P. 47—73.
- Müller K. The New Science of Cybernetics: A Primer // Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. 2013. Vol. 11, N 9. P. 32—46.
- Umpleby S. The Science of Cybernetics and the Cybernetics of Science // Cybernetics and Systems. — 1990. — Vol. 21, N 1. — P. 109—121.
- 62. Горский Ю.М. Системно-информационный анализ процессов управления. Новосибирск: Наука, 1988. 327 с.
- 63. *Горский Ю.М., Степанов А.М., Теслинов А.Г.* Гомеостатика. Гармония в игре противоречий. Иркутск: Репроцентр A1, 2008. 634 с.
- 64. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ междисциплинарного взаимодействия современной информатики и кибернетики: теоретические и практические аспекты // Материалы XII Всеросс. совещания по проблемам управления / ИПУ РАН М, 2014. С. 8625—8636.
- 65. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Неокибернетика в современной структуре системных знаний // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2 (3). С. 3—10.
- 66. *Крылов С.М.* Неокибернетика: Алгоритмы, математика эволюции и технологии будущего. М.: Из-во ЛКИ, 2008. 288 с.
- 67. *Теслер Г.С.* Новая кибернетика. Киев: Логос, 2004. 404 с
- 68. Колин К.К. О структуре научных исследований по комплексной проблеме «информатика» / Социальная информатика: сб. науч. тр. М.: ВКШ при ЦК ВЛКСМ, 1990. С. 19—33.

- 69. Витиих В.А. Проблемы эвергетики // Проблемы управления. 2014. № 4. С. 69—71. / Vittikh V.A. Evolution of Ideas on Management Processes in the Society: From Cybernetics to Evergetics // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24, iss. 5. P. 825—832. URL: http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9414-6/fulltext.html (дата обращения 1.12.2015).
- 70. Харитонов В.А., Алексеев А.О. Концепция субъектно-ориентированного управления в социальных и экономических системах // Политематический сетевой электронн. науч. ж-л Кубанского гос. аграрного ун-та (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ, 2015. № 05 (109). IDA [article ID]: 1091505043. URL: http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/43.pdf (дата обращения 1.12.2015).
- Rosenblueth A., Wiener N., Bigelow J. Behavior, Purpose and Teleology // Philosophy of Science. — 1943, N 10. — P. 18—24.
- Гуревич Й.М., Урсул А.Д. Информация всеобщее свойство материи: Характеристики, оценки, ограничения, следствия. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 312 с.
- 73. *Колин К.К.* Философские проблемы информатики. М.: БИНОМ, 2010. 270 с.
- 74. Колин К.К. Становление информатики как фундаментальной науки и комплексной научной проблемы // Системы и средства информатики. 2006. Спец. вып. «Научно-методологические проблемы информатики». С. 7—58.
- 75. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. М.: СИНТЕГ, 2007. 668 с.
- Новиков Д.А. Методология управления. М.: Либроком, 2011. — 128 с. / Novikov D. Control Methodology. — N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013. — 76 p.
- 77. *Прангишвили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. М.: СИНТЕГ, 2000. 528 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.

**Новиков Дмитрий Александрович** — чл.-корр. РАН, зам. директора, ⊠ novikov@ipu.ru,

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

## Содержание сборника «Управление большими системами», 2015, вып. 57

- ✓ Алгазин Г.И., Матюнин Е.В. Об оптимальных стратегиях асимметрично информированных участников игровых взаимодействий системами
- ✓ Антоненко А.В., Лошкарев И.В., Панков В.С. Решение задачи стимулирования инноваций в электроэнергетике. Часть 1. Оптимизационные модели
- ✓ Ватаманюк И.В., Панина Г.Ю., Ронжин А.Л. Реконфигурация пространственного положения роя роботов
- ✓ **Ведешенков В.А., Курако Е.А., Лебедев В.Н.** О диагностируемости компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами
- ✓ Вожаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Модели принятия коллективных решений в производственных системах
- Выхованец В.С., Крыжановская А.В. Совмещенные сети управления и данных
- ✓ Гераськин М.И., Егорова В.В. Оптимальные механизмы планирования позаказного производства по финансовым и временным критериям
- ✓ Жилякова Л.Ю. Ресурсная сеть с ограничением на емкость аттракторов
- ✓ Лазарев А.А., Тарасов И.А. Составление оптимального расписания движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой с разъездом
  - ✓ Мелентьев В.А. О топологической масштабируемости вычислительных систем
  - ✓ Шумов В.В. Модель безопасности государства
  - √ Яковлев К.С., Баскин Е.С., Андрейчук А.А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств

Тексты статей доступны на сайте http://ubs.mtas.ru/



УДК 517.977:629.7

## ОСОБЕННОСТИ ГИРОСИЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СОБИРАЕМОЙ НА ОРБИТЕ БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ<sup>1</sup>

В.М. Глумов, И.Н. Крутова, В.М. Суханов

Приведены уравнения одноосного углового движения большой космической конструкции, собираемой на орбите из отдельных упругих строительных элементов. Дана методика расчета параметров дискретно изменяющихся динамических свойств собираемой конструкции, модель которой имеет переменные коэффициенты и ярко выраженные свойства упругой многочастотной колебательной системы. Предложен параметрически настраиваемый алгоритм гиросилового управления движением таких объектов, обеспечивающий желаемую динамику на всех этапах роботизированной сборки. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** большая космическая конструкция, сборка на орбите, математическая модель, гиросиловое управление, алгоритм, управление.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматриваются некоторые проблемы гиросиловой стабилизации углового положения больших космических конструкций (БКК) в процессе их поэлементной роботизированной сборки на орбите [1]. Особенности этого типа объектов, к которым могут быть отнесены, например, космические радиотелескопы и ретрансляторы солнечной энергии [2, 3], заключается в дискретно изменяющейся во времени структуре и существенной нежесткости собираемой конструкции в целом. Таким образом, как объект управления БКК в процессе развития представляет собой динамическую систему с переменными коэффициентами, с большим и изменяющимся во времени числом степеней свободы и имеющую ярко выраженные свойства упругой многочастотной колебательной системы, которая в работе [4] названа дискретно развивающейся конструкцией (ДРК). Как механическая система ДРК может рассматриваться в виде некоторой последовательности возникающих в процессе сборки частных механических структур.

Для большей конкретности изложения в качестве объекта исследования примем введенную в работе [4] дискретно изменяющуюся в процессе сборки космическую конструкцию «зонтичного» типа, которая достаточно хорошо подходит для описания регулярных структур типа больших космических зеркал или радиотелескопов [2, 3].

На каждом отдельном этапе сборочного процесса ДРК представляет собой совокупность из n+1 тел (рис. 1), одно из которых — на рис. 1 выделено темным — несущее, с массой  $m_0$  и моментом инерции  $I_0$ . Остальные (носимые тела с параметрами  $m_i$ ,  $l_i$ ,  $i=\overline{1,n}$ ,  $n\in[1,N]$ , где N — общее число носимых тел БКК) представляют собой строительные элементы стержневого типа (одномерные тела с массой  $m_i$ , приведенной к концу невесомого упругого стержня длины  $l_i$ ), присоединяемые к несущему телу в заданных точках  $o_i = (\alpha_i, r_{oi})$  в определенном порядке. Упругость стержневых элементов порождает в рассматриваемой плоскос-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01091).



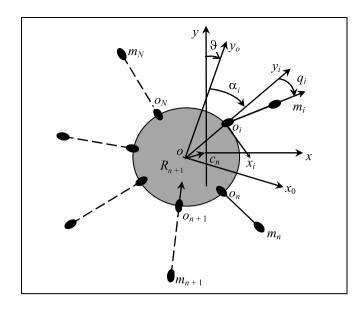


Рис. 1. Текущая структура ДРК

ти малые смещения  $q_i$  концевых масс относительно состояния равновесия. Конструкционное демпфирование упругих колебаний не учитывается.

Без ограничения общности будем считать, что поступательное движение стержневого элемента при соединении с несущим телом направлено по радиусу-вектору, связывающему точку присоединения  $o_i$  с полюсом o.

Первоочередные задачи настоящей работы заключаются в построении математической модели одноосного углового движения ДРК и исследовании ее динамических свойств как объекта управления на последовательности этапов процесса роботизированной сборки БКК в заданной точке пространства.

Заключительная задача состоит в формировании расширенного алгоритма управления, обеспечивающего устойчивость и требуемое качество процессов стабилизации ДРК, собираемой из строительных элементов с пониженной конструктивной жесткостью.

#### 1. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СОБИРАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для описания текущей конфигурации ДРК (см. рис. 1) введем системы координат (СК):  $ox_oy_o$  — СК, связанная с главными осями инерции несущего тела (o — его центр масс);  $o_ix_iy_i$  — локальная СК, в которой определяется отклонение  $q_i$  i-го эле-

мента от его невозмущенного положения,  $o_i y_i$  — ось, проходящая через полюс o и совпадающая с продольной осью элемента в его недеформированном состоянии;  $c_n xy$  — инерциальная СК с началом  $c_n$ , совпадающим с центром масс ДРК на n-м этапе сборки, т. е. после установки n-го элемента конструкции.

Положение точки  $c_n$  в связанной СК  $\mathit{ox}_o y_o$  определяется выражениями

$$x_{c_n} = m_{\Sigma n}^{-1} \sum_{i=1}^{n} m_i x_i, \quad y_{c_n} = m_{\Sigma n}^{-1} \sum_{i=1}^{n} m_i y_i,$$

где

$$\begin{aligned} x_i &= L_i \mathrm{sin}\alpha_i, \quad y_i &= L_i \mathrm{cos}\alpha_i, \quad L_i &= r_{oi} + l_i; \\ m_{\Sigma n} &= m_o + \sum_{i=1}^n m_i. \end{aligned}$$

Момент инерции ДРК относительно центра масс системы на n-м этапе сборки

$$I_n = I_o + m_o \left( x_{c_n}^2 + y_{c_n}^2 \right) + \sum_{i=1}^n m_i r_{i, c_n}^2,$$

где  $r_{i,\,c_n}^2=(x_i-x_{c_n})^2+(y_i-y_{c_n})^2$  — квадрат расстояния между концевой массой i-го элемента  $(i\leq n)$  и центром масс системы  $c_n$  на n-м этапе сборки ДРК.

Рассматривается режим гиростабилизации углового положения собираемой на орбите БКК, к корпусу которой в процессе сборки в отдельные моменты времени присоединяются упругие строительные элементы стержневого типа. Исполнительными органами системы служат двухстепенные силовые гиростабилизаторы (гиродины). Из приведенных в работе [5] уравнений пространственного движения такой системы, соответствующей n-му этапу сборки, следует, что все каналы гиростабилизации даже в рамках линеаризованной модели являются взаимосвязанными, причем структура взаимосвязей обусловлена как инерционными, так и гироскопическими влияниями. Тем не менее, утверждается [6], что в рассматриваемом режиме точной стабилизации при синтезе параметров системы можно пренебречь межканальными перекрестными связями. Это позволяет декомпозировать пространственную систему на три подсистемы, соответствующие изолированным каналам стабилизации. При этом плоские движения в каждом из таких каналов гиростабилизации на



*n*-м этапе сборки могут быть описаны уравнения-ми [6]:

$$I_o \ddot{x} - \sum_{i=1}^n e_i b_i q_i + H \dot{\beta} = M_x,$$

$$I_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} - H \dot{x} = M_G(u_x),$$

$$\tilde{I}_i(\ddot{q}_i + e_i \ddot{x}) + b_i q_i = 0, \ i = \overline{1, n}, \ n \in [1, N], (2)$$

где x — подлежащая стабилизации угловая координата корпуса ДРК (угол  $\vartheta$ , см. на рис. 1);  $q_i$  — координата упругого смещения концевой массы  $(m_i)$ *і*-го стержневого элемента; β — угол прецессии гиродина (ГД);  $I_o$  — момент инерции корпуса ДРК;  $I_G$  — момент инерции ГД относительно оси прецессии; H — кинетический момент ГД;  $k_D$  — коэффициент вязкого трения на подвесе  $\Gamma \Xi$ ;  $(I_i e_i)$  момент инерции і-го стержневого элемента относительно центра масс ДРК на *n*-м этапе сборки  $(\hat{I}_i$  — собственный момент инерции i-го элемента,  $1 \le e_i \le 2$  — параметр i-го тона упругих колебаний конструкции [6]);  $b_i$  — изгибная жесткость присоединяемого упругого элемента, одинаковая для всех элементов ДРК;  $M_{\scriptscriptstyle X}$  — возмущающий момент внешних сил, действующих на корпус ДРК;  $M_c(u_r)$  управляющий момент, прикладываемый относительно оси прецессии ГД моментным приводом;  $u_{x} = u_{x}(x, \dot{x})$  — управляющее напряжение (алгоритм управления) на входе моментного привода.

Умножая в системе (2) последние n уравнений на соответствующие коэффициенты  $e_i$  и складывая полученные результаты с первым уравнением, перепишем ее в виде

$$\left(I_{o} + \sum_{i=1}^{n} \tilde{I}_{i} e_{i}^{2}\right) \ddot{x} + \sum_{i=1}^{n} \tilde{I}_{i} \ddot{q}_{i} + H \dot{\beta} = M_{x},$$

$$I_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} - H \dot{x} = M_G(u_x),$$

$$e_i \ddot{x} + \ddot{q}_i + \Omega_i^2 q_i = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \in [1, N], \quad (3)$$

где 
$$\left(I_o + \sum\limits_{i=1}^n \tilde{I}_i\,e_i^2\right) \doteq I_n$$
— момент инерции ДРК на

n-м этапе сборки;  $\Omega_i = \sqrt{b_i \tilde{I}_i^{-1}}$  — парциальная частота i-го упругого элемента; n — варьируемое число (номер этапа сборки), принадлежащее ряду целых чисел  $n=\overline{1,N}$ ;  $M_x$  — внешнее возмущение и, в частности,  $M_x=M_{R_{n+1}}$  — внешний возмущаю-

щий момент ударного типа, возникающий при установке очередного (n + 1)-го элемента (см. § 3).

По отношению к одноканальной системе гиростабилизации углового положения ДРК, описываемой уравнениями (3), сформулируем следующую задачу.

Общеизвестны повышенные требования к ограниченности массы любых объектов космической техники. Можно принять, что из-за необходимости сохранения конструктивного облика присоединяемого элемента его масса (следовательно, и общая масса ДРК) может быть уменьшена путем снижения изгибной жесткости (b.) элемента, которое отображается соответствующим уменьшением значения параметра  $\Omega_i^2$  в уравнениях (3). Считаем, что все присоединяемые элементы однотипны, т. е. одинаковы относительно механических и геометрических параметров. Поставим задачу найти граничное (малое) значение параметра  $\Omega_{\min}$  такое, что для всякого  $\Omega_i \geq \Omega_{\min}$  собираемая конструкция (в рамках модели (3) с предполагаемым базовым управлением) на всем интервале ее изменения  $(n = \overline{1, N})$  стабилизируется относительно заданного направления с сохранением установленных требований к качеству переходных процессов по точности и времени регулирования на каждом этапе сборки.

#### 2. БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ

Пусть в качестве базового алгоритма управления гиродином (алгоритма гиростабилизации на *n*-м этапе сборки) используется настраиваемый непрерывный пропорционально дифференциальный алгоритм (ПД-алгоритм) управления [7] вида

$$u_{x} = k_{1}^{n} x + k_{2}^{n} \dot{x}. \tag{4}$$

Управляющий момент, прикладываемый к рамке гиродина со стороны моментного привода, формируется в виде

$$M_G^n(u_x) = k_0^n (k_1^n x + k_2^n \dot{x}),$$
 (5)

где  $k_0^n$  — настраиваемый коэффициент усиления, значение которого выбирается в зависимости от текущего момента инерции ДРК  $I_n = \left(I_o + \sum_{i=1}^n \tilde{I}_i \, e_i^2\right)$  на n-м этапе сборки;  $k_1^n$ ,  $k_2^n$  — коэффициенты

на n-м этапе сборки;  $k_1''$ ,  $k_2''$  — коэффициенты ПД-алгоритма, обеспечивающие устойчивость и требуемое качество управления [7] при фиксиро-



ванных значениях параметров  $b_i$ ,  $\tilde{I}_i$  присоединяемых упругих элементов, характеризующихся парциальными частотами  $\Omega_i = 2\pi \tilde{f}_i = \sqrt{b_i \tilde{I}_i^{-1}}$ .

Исходные (номинальные) значения коэффициентов базового ПД-алгоритма (4) определяются на основе задания ограничения на степень устойчивости  $\eta_x$  одноканальной изолированной системы, получаемой из системы уравнений (3) без учета упругости конструкции в виде

$$I_n \ddot{x} + H \dot{\beta} = M_x,$$

$$I_G \ddot{\beta} + k_D \dot{\beta} - H \dot{x} = M_G^n(u_x). \tag{6}$$

Характеристическое уравнение этой системы при ее замыкании отрицательной обратной связью, формирующей прикладываемый к рамке ГД управляющий момент (5), записывается для n-го этапа сборки в виде уравнения

$$D_n(\lambda) = \lambda(\lambda^3 + a_2^n \lambda^2 + a_1^n \lambda + a_0^n) = 0, \quad (7)$$

$$a_2^n = \frac{k_D}{I_G}, \ a_1^n = \frac{H(H + k_0^n k_2^n)}{I_n I_G}, \ a_0^n = \frac{H k_0^n k_1^n}{I_n I_G}.$$
 (8)

Корень  $\lambda=0$  характеристического уравнения (7) соответствует неуправляемой координате  $\beta$ . В этом случае условие асимптотической устойчивости невозмущенного движения x=0 системы (6), с законом управления (5), полученное на основе критерия Гурвица, имеет вид:  $k_D(H+k_0^n k_2^n) > I_G k_0^n k_1^n$ , где коэффициенты  $k_0^n$ ,  $k_1^n$  и  $k_2^n$  определяются на основе системы (6).

Далее известным образом [8] на основе решения смещенного уравнения для исходного уравнения (7), приведенного подстановкой  $y = \lambda + \eta_n$  к виду

$$D(y) = y^3 + b_2^n y^2 + b_1^n y + 1 = 0,$$

где 
$$b_2^n=rac{a_2^n}{\sqrt[3]{a_0^n}},\; b_1^n=rac{a_1^n}{\sqrt[3]{(a_0^n)}^2}$$
 — параметры Вышне-

градского, определяются условия устойчивости для смещенного уравнения, обеспечивающие степень устойчивости  $\eta_n$  исходного характеристического уравнения (7) не меньше заданной  $\eta_x^*$ .

При численном решении задачи в ее исходной (постановочной) части основные параметры гипотетического объекта, изображенного на рис. 1, и

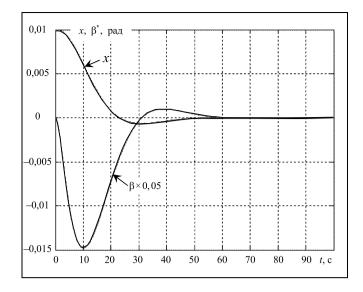


Рис. 2. Желаемая динамика ДРК на всех этапах сборки

гиростабилизатора принимались близкими к параметрам БКК, приведенным в работах [5, 6]:

$$\begin{split} I_o &= 16\ 000\ \mathrm{H}\cdot\mathrm{M}\cdot\mathrm{c}^2, \quad \tilde{I}_i = (1000\div5000)\ \mathrm{H}\cdot\mathrm{M}\cdot\mathrm{c}^2, \\ (I_n &= (16\ 000\div74\ 000)\ \mathrm{H}\cdot\mathrm{M}\cdot\mathrm{c}^2\ \mathrm{при}\ 1 \le e_i < 2), \\ I_G &= 3.5\ \mathrm{H}\cdot\mathrm{M}\cdot\mathrm{c}^2\ (0.36\ \mathrm{KF}\cdot\mathrm{M}^2), \quad H = 170\ \mathrm{H}\cdot\mathrm{M}\cdot\mathrm{c}, \\ k_D &= 2.5\ \mathrm{H}\cdot\mathrm{M}\cdot\mathrm{c}. \end{split}$$

Эталонную динамику ДРК определим переходным процессом в системе (6), характеризующимся [5] малым перерегулированием ( $\sigma \le 10$  %), и временем регулирования  $\bar{t}_p \approx 60$  с при условии достижения требуемой точности (погрешности не более  $|\Delta_x| = 10^{-4}$  рад) на каждом из этапов сборки БКК (рис. 2).

В общем случае значение требуемой погрешности  $|\Delta_x|$  стабилизации ДРК и времени регулирования определяются из условий взаимодействия осуществляющего сборку космического робота с собираемой конструкцией. Задача реализации эталонной динамики ДРК установленного вида решается путем надлежащего (описанного выше) выбора степени устойчивости  $\eta_x^*$  и связанного с ней значения коэффициента усиления системы  $k_0^n$  (или  $k_1^n$ ), соответствующего номеру этапа сборки и типу  $(\tilde{I}_i)$  устанавливаемых элементов конструкции.

На рис. 3 приведены построенные на основе компьютерного моделирования уравнений (5) гра-



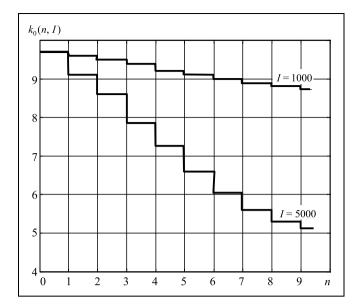


Рис. 3. Изменение коэффициента усиления ПД-алгоритма в процессе сборки ДРК

фики зависимости коэффициента  $k_0^n = k_0(n, \tilde{I})$ ,  $n = \overline{1,9}$ ,  $\tilde{I} = \text{var} = (1000, 5000)$   $\text{H·m·c}^2$  от номера этапа сборки n для той или иной группы ( $\tilde{I} = \text{var}$ ) присоединяемых элементов. Соответствующие графики для промежуточных значений параметра  $\tilde{I} = (1000 \div 5000)$   $\text{H·m·c}^2$  располагаются внутри области, ограниченной графиками, приведенными на рис. 3.

Принятая при этом процедура формирования указанных зависимостей  $k_0^n = k_0(n, \tilde{I})$  такова, что для любого, принадлежащего соответствующему графику, значения  $k_0(n, \tilde{I})$ , обеспечивается желаемая (см. рис. 2) динамика переходных процессов в системе (6) (в частности, требуемое время регулирования  $\bar{t}_{\rm p}^n \leq 3/\eta_n^*$ ) на n-м этапе сборки.

#### 3. МОДЕЛЬ УДАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ ДРК

Не учитывая этапа вывода несущего тела (корпуса) БКК в заданную точку орбиты и осуществления требуемой начальной ориентации, считаем, что сборка БКК, состоящего из N элементов, содержит N этапов. Будем полагать, что каждый этап включает в себя процедуру автоматизированного присоединения строительного элемента к корпусу ДРК и операцию по устранению возмущения регулируемой координаты x от воздействия устанавливаемого элемента на несущее тело. Общее время

выполнения n-го этапа определим как  $\tau_n = \tau_{n1} + \tau_{n2}$ , где  $\tau_{n1}$  — время действия возмущения (удара), возникающего в процессе установки элемента,  $\tau_{n2}$  — время устранения возмущения (время регулирования) до уровня достижения требуемой погрешности  $|\Delta_x|$ .

Для математического описания возмущающего воздействия введем условную модель удара в виде импульса момента, действующего на ДРК n-го этапа сборки, при установке (n+1)-го стержневого элемента. При установке элемента указанным ранее образом (в радиальном направлении по отношению к полюсу o) на интервале времени установки  $\tau_R \doteq \tau_{n1}$  возникает сила  $R_{n+1}$ , приложенная к корпусу ДРК вдоль линии  $o_{n+1}o$ , уравнение которой в СК  $ox_oy_o$  имеет вид

$$y_o = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{n+1}\right) x_o, \tag{9}$$

или в форме нормального уравнения прямой [9], проходящей через начало координат о:

$$-x_{o}\cos\alpha_{n+1} + y_{o}\sin\alpha_{n+1} = 0.$$
 (10)

В общем случае прямая (9) (или (10)) не проходит через центр масс ДРК n-го этапа сборки, т. е. через точку  $c_n$  с координатами  $x_{c_n}$ ,  $y_{c_n}$ , определяемыми по формулам (1). В этом случае расстояние  $d_{n+1}$  от точки  $c_n = (x_{c_n}, y_{c_n})$  до линии (10) действия силы  $R_{n+1}$  составляет величину [9]:

$$d_{n+1} = y_{c_n} \sin \alpha_{n+1} - x_{c_n} \cos \alpha_{n+1}.$$
 (11)

При этом возмущающий момент от действия силы  $R_{n+1}$  = const, возникающей на интервале установки (n+1)-го элемента,

$$M_{R_{n+1}} = R_{n+1} d_{n+1}. (12)$$

Динамика полного процесса (N этапов) сборки БКК моделируется последовательностью уравнений (3) и (4), учитывающей номер выполнения текущего n-го ( $n=\overline{1,N}$ ) этапа сборки. Начало реализации n-го этапа определяется начальным моментом установки n-го элемента, совпадающим с моментом завершения процесса регулирования ( $x \le |\Delta_x|)_{n-1}$  на (n-1)-м этапе. При выполнении требований обеспечения эталонной (см. рис. 2) динамики  $\tau_{n2} \le \overline{t_p} \approx 60$  с и в предположении, что длительность установки  $\tau_{n1}$  для всех элементов одинакова ( $\tau_{n1} = {\rm const} = 2$  с  $\forall n=\overline{1,N}$ ), временные интервалы этапов сборки БКК будут постоянны



 $au_n = au_{n1} + au_{n1} = {\rm const} \ (=65\ {\rm c}) \ \forall n = \overline{1,N},$  а начало реализации n-го этапа определяется моментом соприкосновения n-го устанавливаемого элемента с корпусом ДРК. При этом на интервале времени  $au_{n1}$  к корпусу ДРК со стороны устанавливаемого элемента оказывается приложенным возмущающее воздействие (12), присутствующее в виде  $M_x \doteq M_{R_{n+1}}$  в правой части первого уравнения системы (3).

Импульсы возмущения  $S_x = M_{R_{n+1}} \tau_{n1}$ , амплитуда которых определяется подстановкой выражения (11) в формулу (12), возбуждают в системе (3) на интервале сборки БКК дополнительные движения по координатам x и  $q_i$ . При этом задача управления (4) состоит в гиросиловом подавлении возникшего отклонения по регулируемой координате x до значений  $(x \le |\Delta_x|)_{n=\overline{1,N}}$  за установленное принятой выше эталонной динамикой системы (3), (4) время регулирования  $\tau_{n2} \le \overline{t}_p$  на каждом этапе  $(n=\overline{1,N})$  сборки ДРК.

#### 4. ГИРОСТАБИЛИЗАЦИЯ ДРК С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ПРИСОЕДИНЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Динамику процессов гиростабилизации ДРК с упругими элементами на последовательности и этапов сборки БКК ( $n \in [1, N]$ ) будем исследовать методами компьютерного моделирования уравнений (3) и (4) при введенных в § 2 числовых значениях основных параметров ДРК ( $I_0 = 16~000~\mathrm{H}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{c}^2$ ,  $\tilde{I}_i = 5000 \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{c}^2, I_G = 3.5 \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{c}^2, H = 170 \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{c},$  $k_D = 2.5 \text{ H·м·c}$ ) и коэффициентов базового ПДалгоритма ( $k_0^n = 9.7 \div 5.2$ ,  $n = \overline{1, N}$ , N = 9;  $k_1^n = 1.5$ ;  $k_2^n = 3,5$ ). Исследуемый диапазон парциальных частот присоединяемых упругих элементов определим в виде  $\tilde{f_i} = 0.1 \div 0.01$  Гц  $(\Omega_i^2 = (2\pi \tilde{f_i})^2 =$  $= 0.39 \div 0.0039 \text{ c}^{-2}$ ), позволяющем оценить влияние на динамику управления ДРК установку как относительно жестких строительных элементов  $(\hat{f}_i = [0,1 \div 0,05) \; \Gamma_{\rm U})$ , так и элементов с существенно нежесткими свойствами ( $\tilde{f}_i \leq 0.03 \, \Gamma$ ц).

Проведенные методами компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink исследования, некоторые результаты которого представлены на рис. 4 и 5 в виде графиков переходных процессов в системе гиросиловой стабилизации углового положения ДРК (3), (4), выявили наличие определенной зависимости времени регулирования от

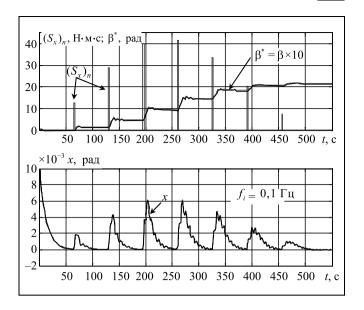


Рис. 4. Переходные процессы при сборке БКК из элементов с парциальной частотой  $\tilde{f_i}=0,1$  Гц

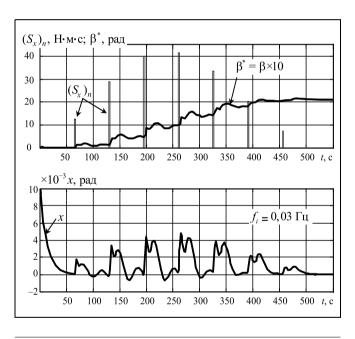


Рис. 5. Переходные процессы при сборке БКК из элементов с парциальной частотой  $\tilde{f_i}=0.03~\Gamma$ Ц

парциальной частоты  $\Omega_i = 2\pi \tilde{f}_i$  устанавливаемых упругих элементов. В частности, для ДРК с принятыми выше конкретными значениями параметров найдено граничное значение парциальной частоты  $\Omega_{\min} = 0.314 \text{ c}^{-1}$  ( $\tilde{f}_{\min} = 0.03 \text{ Гц}$ ), ниже которого для обеспечения желаемой динамики требуется вводить усложненные алгоритмы управления.



В относительно высокочастотной области парциальных частот упругих элементов ( $\tilde{f}_i \geq \tilde{f}_{\min} = 0.05~\Gamma$ ц) желаемая динамика процессов регулирования сохраняется (рис. 4, см. кривые для  $\tilde{f}_i = 0.1~\Gamma$ ц) при значениях  $k_0(n,~\tilde{I})$ , полученных при решении задачи параметрического синтеза базового алгоритма гиростабилизации ДРК с жесткими элементами (см. рис. 3).

На приведенных графиках видно, что импульсы возмущающих моментов  $(S_x)_n = M_{R_{n+1}} \tau_{n1}$ , возникающие при установке элементов конструкции, вызывают возмущения угла ориентации ДРК x и упругих координат  $q_i$ , оказывающих дополнительное влияние на движение x(t). Видно также, что управляющее воздействие (отображаемое угловыми скоростями прецессии гиродина  $\dot{\beta}$ ), прикладываемое к корпусу ДРК со стороны системы гиростабилизации, направлено на устранение возникающих отклонений регулируемой координаты.

В области пониженных жесткостей устанавливаемых элементов ( $\tilde{f}_i < \tilde{f}_{\min} = 0.05~\Gamma$ ц) при тех же значениях  $k_0(n,~\tilde{I})$  параметров базового алгоритма время регулирования перестает отвечать требованиям желаемой динамики ( $\tau_{n2} > \bar{t}_p$ ). Это, как видно из представленных на рис. 5 (для случая  $\tilde{f}_i = 0.03~\Gamma$ ц) графиков, приводит к ухудшению точности ( $x_n \le |\Delta_x|$ ) $\Big|_{n=\overline{1,N}}$  в моменты присоединения элементов конструкции, что может оказаться недопустимым по условиям сборки ДРК.

Подобную динамику процессов гиростабилизации углового положения ДРК на последовательности этапов сборки БКК следует считать неудовлетворительной, поэтому необходима коррекция исходного алгоритма управления (4).

#### 5. РАСШИРЕННЫЙ АЛГОРИТМ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ДРК С НИЗКОЧАСТОТНЫМИ УПРУГИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Для решения задачи коррекции алгоритма управления ДРК с низкочастотным спектром упругих колебаний присоединяемых элементов воспользуемся предложенным в работе [10] подходом, основанным на расширении базового алгоритма  $u_x = k_1^n x + k_2^n \dot{x}$  дополнительным сигналом вида

$$u_{a} = k_{1q}^{n} \hat{q}_{\Sigma} + k_{2q}^{n} \hat{q}_{\Sigma},$$

где  $\hat{q}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} q_{i}$ ,  $\hat{q}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} \hat{q}_{i}$  — получаемые с помощью фильтра Калмана [11] сигналы оценок упругих координат ДРК.

Соответствующие коэффициенты усиления  $k_{1q}^n$  и  $k_{2q}^n$  определяются, исходя из выполнения сформулированных в работе [10] требований к устойчивости и качеству (быстродействию) процесса гашения упругих колебаний с помощью прикладываемого к входу гиродина управляющего моментного воздействия

$$M_G^n(u_x) = k_0^n (k_1^n x + k_2^n \dot{x} + k_{1a}^n \hat{q} + k_{2a}^n \hat{q}).$$
 (13)

Применяя предложенный в работе [10] итерационный алгоритм вычисления оптимальных значений  $(k_{1q}^n, k_{2q}^n)_{\text{opt}}$ , позволяющих решать задачу минимизации времени регулирования  $(\tau_{n2} \le \overline{t}_p \approx 3/\eta_q^n)$ 

$$\eta_{q\max}^n = \max_{k_{1q}^n, k_{2q}^n} \min_i |\operatorname{Re}\lambda_i|, \quad i = \overline{1, n},$$

для любого фиксированного значения парциальной частоты  $\Omega_i = 2\pi \tilde{f}_i$  из низкочастотного диапазона  $(\tilde{f}_i \leq 0.05)$ , можно найти n пар оптимальных значений коэффициентов  $(k_{1q}^n, k_{2q}^n)_{\rm opt}$ , которые соответствуют максимальному удалению действительной части ближайшего к мнимой оси корня характеристического уравнения системы (3), определяя, в конечном счете, минимальное время  $\bar{t}_{\rm p \; min} \simeq 3/\eta_{\rm max}^n$  гашения плохо демпфируемой базовым управлением (5) упругой низкочастотной моды  $q_{\Sigma}^n$ .

В частности, решение этой задачи для ДРК с числовыми значениями параметров системы (3), приведенных в начале параграфа 4 (в том числе  $\tilde{I}_i = 5000~\mathrm{H}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{c}^2,~\tilde{f}_i = 0,03~\mathrm{\Gamma u}),$  дало представленные в таблице соотношения коэффициентов ( $k_{1q}^n,~k_{2q}^n$ ) ont.

Результаты моделирования уравнений (3) управления ориентацией ДРК (собираемой из упругих элементов с параметрами  $\tilde{I}_i = 5000 \text{ H} \cdot \text{m} \cdot \text{c}^2$ ,

#### Оптимальные значения параметров расширенного алгоритма

$n$ $k_{1qopt}^n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,27	0,30	0,34	0,35	0,40	0,43	0,09	0,0	0,0
$k_{2q}^{n}$ opt	0,49	0,46	0,47	0,49	0,53	0,62	0,07	0,0	0,0



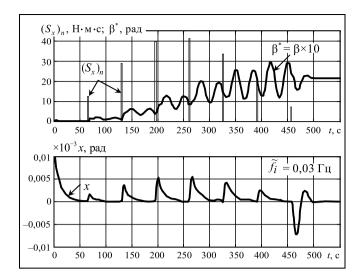


Рис. 6. Переходные процессы при сборке БКК из элементов с парциальной частотой  $\tilde{f}_i = 0.03$   $\Gamma$ ц при работе расширенного алгоритма гиростабилизации (13)

 $\tilde{f_i} = 0.03$  Гц) с помощью расширенного алгоритма гиростабилизации (13) со значениями его параметров из таблицы представлены на рис. 6 графиками переходных процессов x(t, n), управляющих  $(\dot{\beta}(t))$  и возмущающих  $(S_v)$  воздействий.

Сравнение результатов моделирования, представленных осциллограммами на рис. 5 и 6, показывает возможность обеспечения желаемой динамики ДРК по регулируемой координате x(t, n) в процессе сборки БКК из облегченных элементов конструкции ( $\tilde{f}_i \leq 0.03$  Гц) при наличии оценок  $\hat{q}_{\Sigma}$ ,  $\hat{q}_{\Sigma}$  упругих колебаний элементов ДРК, используемых для формирования расширенного алгоритма гиростабилизации (13).

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложенный подход к исследованию динамики гиросиловой стабилизации автоматически собираемой на орбите большой космической конструкции позволяет выявить особенности, связанные с управлением новым классом объектов космической техники, отличающихся дискретно изменяющейся во времени моделью с ярко выраженными свойствами многочастотной колебательной системы. Показана необходимость коррекции базового алгоритма, связанной с изменением на каждом этапе сборки инерционных свойств дискретно развивающейся конструкции. Определена системно обеспечиваемая возможность уменьшения общей массы конструкции благодаря снижению жесткостных свойств (следовательно, и металлоем-

кости) устанавливаемых строительных элементов. Предложенный в работе расширенный алгоритм работы гиросиловой системы управления позволяет обеспечить требуемую точность и время регулирования, соответствующие установленным показателям качества управления эквивалентным жестким объектом.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. *Ishijima Yo., Tzeranis D., Dubowsky S.* The on-orbit maneuvering of large space flexible structures by free-flying robots // Pros. of the 8 Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (SAIRAS-2005), Munich, 5—8 Sept., 2005, Noordwijk: ESTEC. 2005. P. 419—426. (ESA SP. ISSN 1609-042X. No 603).
- Буякас В.И. Многозеркальные управляемые конструкции // Космические исследования, т. 28. № 5. —1990. С. 776—786.
- Bekey I. An extremely large yet ultra lightweight space telescope and array. (Feasibility assessment of a new concept). Bekey Designs, Inc.46245 Quarter Charge Dr. Annandale, VA 22003. — 1999.
- Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М. Метод построения математической модели дискретно развивающейся большой космической конструкции // Автоматика и телемеханика. 2003. № 10. С. 15—33.
- Сомов Е.И. Динамика многократной цифровой системы пространственной гиросиловой стабилизации упругого космического аппарата // Динамика и управление космическими объектами. — Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1992. — С. 46—76.
- Бурносов С.В., Козлов Р.И. Синтез цифровой системы гиростабилизации упругого КА методом ВФЛ // Там же. — С. 85—101.
- 7. *Крутова И.Н., Суханов В.М.* Динамика гиросиловой стабилизации крупногабаритных спутников при использовании настраиваемого ПД-алгоритма управления // Проблемы управления. 2012. N = 5. C. 74 80.
- 8. *Воронов А.А.* Основы теории автоматического управления. Ч. 1. М.-Л.: Энергия, 1965.
- 9. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986.
- Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Стабилизация низкочастотных колебаний конструкции крупногабаритного спутника с гиросиловым управлением // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 3. — С. 120—135.
- 11. Ермилов А.С., Ермилова Т.В. Непрерывный фильтр Калмана для оценивания координат упругих колебаний деформируемых космических аппаратов с гиросиловой стабилизацией // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: Тез. докл. 2-й Всерос. научно-техн. конф. М.: МОКБ «Марс», — 2012. — С. 21—22.

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

**Глумов Виктор Михайлович** — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, ⊠ vglum@ipu.ru,

**Крутова Инесса Николаевна** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник,

Суханов Виктор Миньонович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, 

зав. лабораторией, 

зав. учичения зав. учичени

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





# Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН осуществляет подготовку (по очной и заочной форме) научных кадров в аспирантуре

Перечень направлений подготовки в аспирантуре ИПУ РАН:

#### • 01.06.01. Математика и механика

Специальность:

01.01.02 Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление

#### 09.06.01 Информатика и вычислительная техника

#### Специальности:

- 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)
- 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления
- 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)
- 05.13.10 Управление в социальных и экономических системах
- 05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей
- 05.13.12 Системы автоматизации проектирования (по отраслям)
- 05.13.15 Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети
- 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

#### 38.06.01 Экономика

Специальности:

08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в том числе управление инновациями)

08.00.13 Математические и инструментальные методы экономики

#### ■ Сроки обучения:

В очной аспирантуре — 4 года (по направлению подготовки 38.06.01 — 3 года); в заочной аспирантуре — 5 лет (по направлению подготовки 38.06.01 — 4 года).

Институт имеет бессрочную лицензию на высшее образование и государственную аккредитацию.

Прием документов в аспирантуру с 1 июля по 30 сентября. Зачисление в аспирантуру по результатам конкурса до 1 ноября. Иногородним аспирантам предоставляется общежитие.

В Институте читаются лекции для аспирантов по следующим программам:

- эконометрический анализ экономического развития (д-р экон. наук Р.М. Нижегородцев);
- моделирование систем управления (д-р техн. наук А.Л. Генкин);
- теория робастного управления (д-р техн. наук А.П. Курдюков);
- вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети (д-р техн. наук В.М. Вишневский);
- системы автоматизации проектирования (д-р техн. наук А.В. Толок).



#### не забудьте подписаться!

Подписку на журнал «Проблемы управления» можно оформить в любом почтовом отделении (подписной индекс 81708 в каталоге Роспечати или 38006 в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.



## | IFAC

#### **МЕРОПРИЯТИЯ**

#### Международной федерации по автоматическому управлению

Мероприятие	Дата	Место проведения	
CDOS IFAC IEEE (Madras Section & Bangalore Section) Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems — ACODS 2016	Feb 01—05, 2016	NIT Tiruchirappalli, INDIA	
IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics — 7th MCPL 2016	June 22—24, 2016	Bremen, GERMANY	
IFAC Symposium on Control in Transportation Systems — 14th CTS 2016	May 18—20, 2016	Istanbul, TURKEY	
IFAC Symposium on Large Scale Complex Systems: Theory and Applications — 14th LSS 2016	May 26—28, 2016	Riverside, USA	
IFAC Symposium on Advances in Control Education — 11th ACE 2016	June 1—3, 2016	Bratislava, SLOVAKIA	
IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences — 4th ICONS 2016	June 1—3, 2016	Reims, FRANCE	
IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems — 11th DYCOPS 2016	June 6—8, 2016	Trondheim, NORWAY	
IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations — 2nd CPDE 2016	June 13—15, 2016	Bertinoro, ITALY	
IFAC Symposium on Advances in Automotive Control — 8th AAC 2016	June 20—23, 2016	Kolmården Wildlife Resort (near Norrköping), SWEDEN	
IFAC Workshop on Time Delay Systems — 13th TDS 2016	June 22—24, 2016	Istanbul, TURKEY	
IFAC Symposium on System Structure and Control — 6th SSSC 2016	June 22—24, 2016	Istanbul, TURKEY	
IFAC IEEE, IFORS, IFIP, INFORMS Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control — 8th MIM 2016	June 28—30, 2016	Troyes, FRANCE	
EUCA, IEEE CSS IFAC Conference on European Control Conference (in cooperation with IFAC) — 15th ECC 2016	June 29—July 1, 2016	Aalborg, DENMARK	
IFAC/IEEE RAS Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles — 9th IAV 2016	June 29—July 1, 2016	Messe Leipzig, GERMANY	
IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing — 12th ALCOPS 2016	June 29—July 1, 2016	Eindhoven, NETHERLANDS	
IFAC Workshop on Periodic Control Systems — 6th PSYCO 2016	June 29—July 1, 2016	Eindhoven, NETHERLANDS	
Conference on American Control Conference (in cooperation with IFAC) — ACC 2016	July 6—8, 2016	Boston, USA	
IEEE (CSS) and IEEE (SSIT) IFAC Conference on Norbert Wiener in the 21st Century	July 13—15, 2016	Melbourne, AUSTRALIA	

Более подробную информацию см. на сайте www.ifac-control.org/



### **CONTENTS & ABSTRACTS**

ulinich A.A.
N INFORMATICS AND CONTROL SCIENCES
art 1. COGNITIVE AND SEMIOTIC APPROACHES
EMIOTIC COGNITIVE MAPS.

The new model of semiotic cognitive maps, based on principles of applied semiotics is suggested, representing a symbiosis of classical cognitive maps in the form of a cause-effect network (digraph) and a conceptual structure in the form of a qualitative conceptual framework — conceptual system — set of concepts of the subject domain connected by the relation «sort-kind». It is shown that the suggested model allows representing the set of semiotic cognitive maps of a subject domain as partially ordered set of signs: name, content and size, defining these cognitive maps. Suggested is the subject domain interpreting conceptual template construction algorithm, directed on supporting the processes of verification and interpretation of cause-effect relations in a subject domain, set by the cognitive map.

**Keywords:** cognitive map, cognitive modeling, sign, sign system, semiotics, applied semiotics, conceptual framework, conceptual system.

## MODELS OF TOLERANT THRESHOLD BEHAVIOR (FROM T. SHELLING TO M. GRANOVETTER).....11 Breer V.V.

Models of tolerance are considered starting from the works of T. Shelling. It is shown, that tolerant threshold behavior, including the basic Shelling's model, could be equivalently transformed into the model of Granovetter with certain cumulative distribution function of thresholds. The model describing agents' competition inside a group with their sympathies outside of this group (a sort of «upside-down tolerance») is studied. These both types of behavior are explored in continuous time, additionally considering the effects of forgetting and delay leading to damped and undamped oscillations.

**Keywords:** tolerance, model of bounded neighborhood, Shelling's model, Granovetter's model.

#### 

A model of opinion dynamics in a social network which also contains the two centers of influence is considered. Network members can influence each other, while the opinion dynamics is described by a time-homogeneous Markov chain. The possibility of reaching a consensus in the network is examined for two models of influence: either centers can directly influence each other or not. The parameters of the social network for reaching the consensus are found. When no consensus can be reached, the notion of a consensus of majority is introduced, obtaining the parameters of the network for reaching it. Theoretical results are illustrated with numerical examples.

**Keywords:** DeGroot model, influence, consensus, opinion dynamics.

#### 

#### Plyaskina N.I., Kharitonova V.N.

It can be noted, that today's structural reforms of real sector in Russian Federation increased the relevance of strategic management of complex multi-regional and multi-sector megaprojects, aimed to form the new infrastructure and industrial basis in Russia, development of natural resources of the Arctic and East regions of Russia, demanded on world markets. Pointed out is that problems of state management effectiveness and reconciliation of institutional stakeholders interests — private business, state and regions — come to the foreground. Suggested are the methodical approach and tools for complex interregional multi-sector megaprojects strategy development and their implementation management, based on program and target planning principles, institutional conditions variations modeling and state support mechanisms.

**Keywords:** investment project, megaproject, scenario, institutional conditions, strategic management, program and target plan-

ning, reconciliation of interests, state support, network model, imitation model, investment program.

#### Klochkov V.V., Cherner N.V.

The problem of rational use and development of the production potential of enterprises included into the integrated structures (mainly, state corporations) is considered. The methods to estimate the efficiency of managing the member companies' resources at the level of the integrated structure, including the use and development of individual productions' capacities, are suggested.

**Keywords:** integrated structures, production capacity, capacity utilization, bottlenecks, investment, development, efficiency, management, coordination, specialization.

#### 

The method of calculation the guaranteed (maximum) modification time of software with prolonged iterative development process on the basis of «Network calculus» apparatus is presented. The calculations of the NPP APCS software maximum modification time at the stages of commissioning and operation for various modification techniques are conducted.

**Keywords:** modification time, software, «Network calculus», NPP.

THE ORGANIZATION OF SINGLE FAULTY COMPONENTS DIAGNOSING IN DIGITAL SYSTEMS WITH MINIMAL QUASICOMPLETE GRAPH STRUCTURE BY DIMENSION 7×7 WITH TWO PATHS BETWEEN TWO ABONENTS....65

#### Vedeshenkov V.A

Proposed is the diagnosing organization, based on single verification test and 14 subsets of 4 additional tests for each «faulty» subsystem. The version of tests' subset constructing, providing the uniformity of the syndromes for testing components with the same numbers in any «faulty» subsystem, is suggested. The required diagnosing accuracy is ensured by the difference of test syndromes in any «faulty» subsystem. The example of using algebra-logical method for syndrome decoding is presented.

**Keywords:** digital system, minimal quasicomplete graph by dimension  $7 \times 7$ , component, test syndrome, «faulty» subsystem.

# The evolution of cybernetics is briefly considered; new stage of its development is introduced as «cybernetics 2.0» — a science of general regularities in systems' organization and control. Substantiated is the topicality of elaborating a new branch of cybernetics, i.e., organization theory ( $O^3$ ) which studies an organization as a property,

process and system. **Keywords:** cybernetics, system, organization, control.

## FEATURES OF GYRO-FORCE STABILIZATION OF LARGE SPACE STRUCTURES ASSEMBLED IN AN ORBIT.....82 Glumov V.M, Krutova I.N., Sukhanov V.M.

Proposed are the equations of single-axis angular motion of the large space structure assembled in an orbit from separate elastic structural units. The parameters calculation procedure is given for discretely changing dynamic properties of structure assembled, which model has variable coefficients and distinct properties of elastic multi-frequency oscillatory system. Parametrically adjustable gyro-force attitude control algorithm is suggested to provide the desirable dynamics support at all stages of robotic assembly. The effectiveness of the algorithm is verified with computer simulation.

**Keywords:** large space structure, orbit assemblage, mathematical model, gyro-force attitude control, control algorithms.







#### Продукты и технологии

- программно-технические решения для верхнего уровня АСУТП;
- SCADA (с адаптацией под требования заказчика);
- операционные системы для АСУ (поставка готовых и изготовление по ТЗ);
- технологии интеграции АСУ из разнородных систем автоматики;
- технологии и продукты для разработки и контроля безопасных и защищенных АСУТП;
- простые и сложные пульты управления для АСУ с 1 млн. сигналов и более;
- -средства оценки кибербезопасности;
- -поддержка работы на процессорах X86 и APM, RISK;
- -разработаны в соответствии с POSIX и ЕСПД.

#### Особенности:

- собственная разработка;
- -"атомное" качество;
- -масштабируемость (1 млн. сигналов и более);
- долговременная поддержка российских разработчиков;
- -доступные исходные коды:
- кибербезопасность;
- поставки за рубеж.

Разработки внедрены на АЭС "Бушер", Исламская Республика Иран и АЭС "Куданкулам", Республика Индия.

#### **Услуги**

- разработка программно-технических компонентов и комплексов: верхний/средний уровень/встраиваемые системы;
- верификация и валидация АСУ, включая исходные тексты, по качеству/информационной безопасности;
- разработка ПО для проектного анализа контролепригодности, технической эффективности, надежности, техногенной безопасности технических систем:
- анализ эксплуатационной готовности технологических комплексов;
- анализ кибербезопасности;
- консультации специалистов;
- обучение.

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ им. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ул. Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия.

телефон: +7 (495) 334-89-10; факс: +7 (495) 334-93-40, +7 (499) 234-64-26 e-mail: ipu31@mail.ru, poletik@inbox.ru http://www.ipu.ru

