

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1/2019

CONTROL  SCIENCES

Редакционный совет

Акад. РАН С.Н. Васильев, акад. 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.М. Вишневский, д-р экон. наук М.И. Гераськин, д-р экон. наук В.В. Ключков, 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-ра техн. наук А.С. Мандель, Р.В. Мещеряков, д-р биол. наук А.И. Михальский, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков (гл. редактор), д-ра техн. наук Б.В. Павлов, Ф.Ф. Пашенко (зам. гл. редактора), д-р физ.-мат. наук Л.Б. Рапопорт, д-р экон. наук С.В. Ратнер, 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

Н.Е. Максимова

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 № PB119

Подписано в печать
21.01.2019 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 на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

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

1.2019

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П. и др. Проблемы развития цифровой энергетики в России 2

Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В. Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 2. Нестандартные подходы к проблеме 15

Управление в социально-экономических системах

Алескерев Ф.Т., Тверской Д.Н. Моделирование влияния внешней среды на возникновение специализации в абстрактных системах 26

Полунин Ю.А. Синтез методов нелинейной динамики и регрессионного анализа для исследования социально-экономических процессов 32

Трошин Д.В. Методический подход к моделированию рационального сценария обеспечения экономической безопасности России в долгосрочной перспективе 45

Шевыренков М.Ю. Оценка влияния активных прогнозов на рынки энергоносителей на примере европейского рынка газа 55

Управление техническими системами и технологическими процессами

Твердохлебов В.А. Z-рекуррентные структуры процессов в задачах контроля и диагностирования 63

Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Многоуровневая модель ситуационного управления технологическими процессами обработки деталей в машиностроении 73

Управление подвижными объектами и навигация

Дорри М.Х., Рошин А.А., Серeda Л.А. Построение стенда для визуализации движения подводного аппарата по траектории 83

* * *

Contents and abstracts 88

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев, Л.В. Массель, Д.А. Новиков,
А.Н. Райков, С.М. Сендеров, В.А. Стенников

Отмечено, что в условиях исчерпания потенциала экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов цифровая трансформация является для России «окном» больших возможностей. Показано, что в таких условиях возрастает необходимость цифровизации энергетических систем с учетом усложнения и снижения уровня самоадаптации и самоустойчивости к множеству дестабилизирующих факторов. Даны сравнительные оценки уровня внимания специалистов к сквозным цифровым технологиям в различных отраслях, из которых следует, что в энергетическом секторе экономики это внимание имеет явный резерв роста. Отмечено, что значительная часть сложного современного цифрового оборудования поставляется в энергетическую отрасль зарубежными фирмами, что представляет собой явную угрозу энергетической безопасности страны и требует усиленного внимания к решению проблемы импортонезависимости. Обоснована потребность в обеспечении лидирующей системообразующей роли Российской академии наук в прорывном развитии российской цифровой энергетики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное моделирование, прорывное развитие, цифровые технологии, цифровая энергетика, энергетическая безопасность.

ВВЕДЕНИЕ. ЦИФРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РАМКАХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ. МИРОВЫЕ ТРЕНДЫ

Цифровая энергетика создается и развивается в рамках и с учетом «Стратегии научно-технологического развития (СНТР) Российской Федерации¹» (которая определяет одним из больших вызовов «переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике,... формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии...»), Программы «Цифровая экономика Российской Федерации», «Дорожной карты "Энерджинет"». Есть и весомые отраслевые программы, например, государственная информационная система ТЭК реализуется в рамках Федерального закона № 382-ФЗ от 03.12.2011 г. «О государственной информационной системе топливно-энергетического комплекса»; Минэнерго запуска-

¹ Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».

ет программу «Цифровая трансформация электроэнергетики России».

В Указе Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» № 204 от 7 мая 2018 г. поставлена задача: «...преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы, включая... энергетическую инфраструктуру, посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений» путем «...внедрения интеллектуальных систем управления электросетевым хозяйством на базе цифровых технологий».

В СНТР к наиболее значимым вызовам в смысле научно-технологического развития Российской Федерации отнесено исчерпание возможностей экономического роста России, основанного на экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов, на фоне формирования цифровой экономики и появления ограниченной группы стран-лидеров, обладающих новыми производственными технологиями и ориентированных на использование возобновляемых ресурсов. Создание технологий происходит все больше на цифровой основе, по-



этому **цифровая трансформация является для России и вызовом, и «окном» больших возможностей.**

Энергетика — базовый сектор экономики, обеспечивающий нормальное функционирование остальных отраслей и жизнедеятельность населения. Она представлена инфраструктурными энергетическими системами электро-, тепло-, газо-, нефте- и нефтепродуктоснабжения. Современные энергетические системы — сложнейшие технические объекты, созданные человеком и развивающиеся с применением инновационных, в том числе интеллектуальных, технологий для производства, передачи, распределения и хранения энергоресурсов. Актуально технологическое объединение энергетических систем в виде взаимосвязанных по режимам функционирования и решениям по развитию интеллектуальных интегрированных энергетических систем [1]. Функционирование таких чрезвычайно сложных территориально распределенных энергетических систем, включающих в себя десятки тысяч и более элементов (объектов), в принципе невозможно без соответствующих им по сложности систем управления. Эффективность управления обеспечивается представительной обширной регулярно обновляемой достоверной информацией о параметрах и переменных состояния управляемых систем. Эта информация измеряется, обрабатывается, передается и представляется для мониторинга состояния и выработки управляющих воздействий, которые, в свою очередь, передаются к соответствующим исполнительным устройствам и реализуются ими. Все эти операции с информацией выполняются развитой информационно-коммуникационной подсистемой конкретной энергетической системы.

Уже в настоящее время, а в будущих энергетических системах — в еще большей мере, физическая (силовая) и информационно-коммуникационная подсистемы становятся сопоставимыми по сложности и ответственности с точки зрения обеспечения возрастающих требований потребителей к надежности их энергоснабжения и качеству предоставляемых им энергоресурсов. Возрастание требований потребителей в части надежности и качества объективно обусловлено массовой компьютеризацией и цифровизацией их технологических процессов. В свою очередь, удовлетворение этих существенно возросших требований единственно возможно путем цифровизации энергетических систем. Это означает применение цифровых технологий и устройств на всех стадиях работы информационно-коммуникационных подсистем от измерения параметров и переменных состояния цифровыми измерительными приборами, через цифровую передачу и обработку этой информации до реализации управляющих воздействий исполнительными цифровыми устройствами. С учетом

активного применения современных информационных технологий и методов искусственного интеллекта энергетические системы становятся интеллектуальными киберфизическими системами.

Объективная необходимость цифровизации энергетических систем возрастает еще и в связи с их усложнением и снижением самоадаптации и самоустойчивости к внутренним и внешним дестабилизирующим факторам, что наиболее характерно для электроэнергетических систем (ЭЭС) вследствие массового применения силовой электроники для подключения некоторых типов генерирующих установок, локальных электроприемников и частотного регулирования электродвигателей. Это требует существенного повышения эффективности управления режимами ЭЭС путем обработки больших объемов данных и уменьшения интервалов выработки управляющих воздействий, что может быть рационально организовано на основе цифровизации процесса управления [2].

По имеющимся оценкам, цифровизация энергетических систем имеет широкий спектр достоинств, таких как снижение текущих и капитальных затрат на реконструкцию и развитие систем, снижение затрат на техническое обслуживание и ремонты и увеличение срока службы оборудования, повышение производительности работы персонала и ряд других. Чрезвычайно важно общее качественное повышение эффективности реализации всего цикла задач информационно-коммуникационной и управляющей подсистемы. Цифровизация энергетических систем позволит существенно повысить эффективность принимаемых решений и качество функционирования энергетических систем, надежность энергоснабжения потребителей с учетом их возросших требований, качество энергоресурсов.

Мировые тренды в области цифровизации разительны. Скажем, мировой доход на рынке больших данных и бизнес-аналитики сейчас составляет около \$140 млрд., и он ежегодно растет на 12—15 %. Емкость глобального рынка систем искусственного интеллекта (ИИ) к 2024 г. может вырасти до \$3 трлн. Глобальные вложения, связанные с блокчейн-технологиями, в 2021 г. достигнут \$9,7 млрд. По квантовым компьютерам прогнозируется объем рынка к 2024 г. \$11 млрд. Общий глобальный доход от поставки IoT-технологий (интернет вещей) растет со среднегодовым темпом в 15 % и составит \$19 млрд. в 2025 г. Робототехника и сенсорика — в 2017 г. объем мирового рынка составил \$39,3 млрд., прогноз на 2020 г. — \$152 млрд. Беспроводные сети — прогноз на 2025 г. почти \$10 млрд.

В материалах [3] приведены оценки относительного уровня цифровизации различных отраслей (рис. 1).



Рис. 1. Оценки цифровизации отраслей экономики в России и Европе: ¹ Великобритания, Германия, Голландия, Италия, Франция и Швеция; ² за исключением химической и фармацевтической промышленности, производства нефтепродуктов, телевизионной аппаратуры и офисного оборудования; *ИКТ* — информационно-коммуникационные технологии

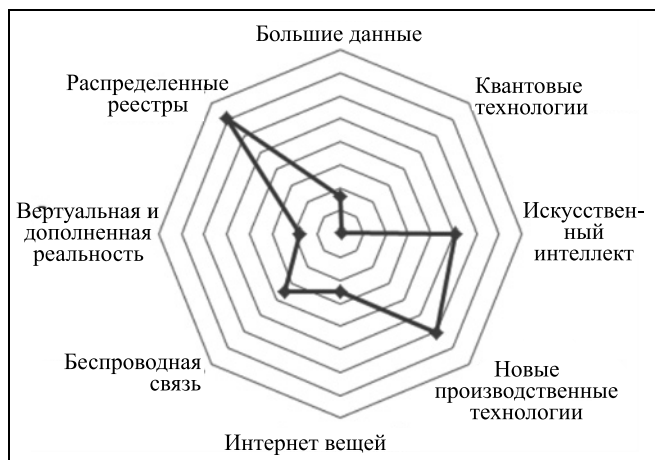


Рис. 3. Соотношение числа сообщений по сквозным технологиям СНТР

На рис. 2 (см. третью страницу обложки) проиллюстрировано число публикаций по различным сквозным технологиям СНТР и по отраслям (2018 г., массив 140 тыс. сообщений, Гугл/Новости).

Соотношение сообщений по сквозным технологиям СНТР на новостной ленте в самой энергетической отрасли приведено на рис. 3 (около 14 тыс. сообщений за 2018 г.).

Сравнение научно-технологических заделов по сквозным технологиям СНТР на международном уровне можно проиллюстрировать табл. 1, отражающей число публикаций в Web of Science (WoS, массив за 2008—2017 гг., без учета ESCI, данные Национального центра цифровой экономики МГУ им. М.В. Ломоносова).

В экспертно-аналитическом докладе [4] отмечаются следующие **мировые тренды** и констатируется **смена энергетических парадигм** (табл. 2).

- Удешевление новых технологий для применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Стоимость электроэнергии от различных источников меняется в пользу ВИЭ. Динамика ее снижения за последние годы значительна. Например, стоимость ветроустановок снизилась в 10 раз с 1980 по 2013 г.
- Глубокая децентрализация производства электроэнергии. Скорость и простота установки и обслуживания распределенной генерации (работающей на газе, местном топливе или возобновляемых источниках), более низкая ее стоимость по сравнению с подключением к сети общего пользования, — все это приводит к масштабному развитию распределенной энергетики в мире. Данная тенденция будет усиливаться благодаря появлению систем хранения (накопителей) электроэнергии.
- Распространение технологий и практики энергосбережения. По данным МЭА, ежегодно энергоемкость ВВП стран — членов организации сокращается более чем на 2 %.
- Распространение цифровых сетей и интеллектуальных систем управления. Инфраструктура благодаря цифровым технологиям и автоматике становится активно-адаптивным элементом энергетической системы. В сочетании с системами интеллектуального управления коммерческими и технологическими процессами сетевая инфраструктура преобразуется в новую киберфизическую платформу для гибкого и эффективного энергообеспечения потребителей.

Таблица 1

Научно-технологические заделы сквозных технологий СНТР

Где	Большие данные	Искусственный интеллект	Распределенные реестры	Квантовые технологии	Новые производственные технологии	Интернет вещей	Робототехника и сенсорика	Беспроводная связь	Виртуальная и дополненная реальности
В мире	2153	19 896	29	30	13 126	1291	4625	1664	1887
В России	10	115	0	2	272	10	41	4	65

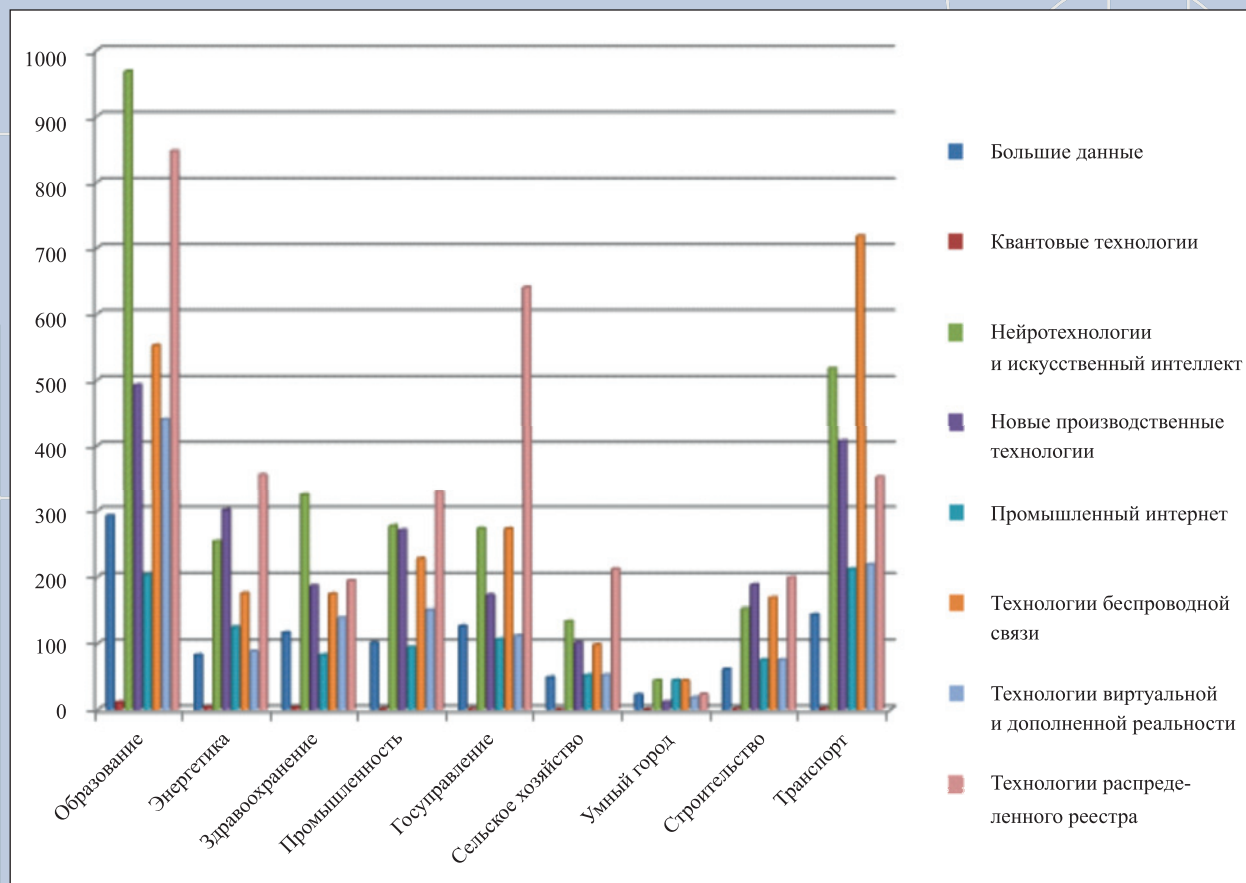


Рис. 2. Соотношение числа публикаций по различным технологиям

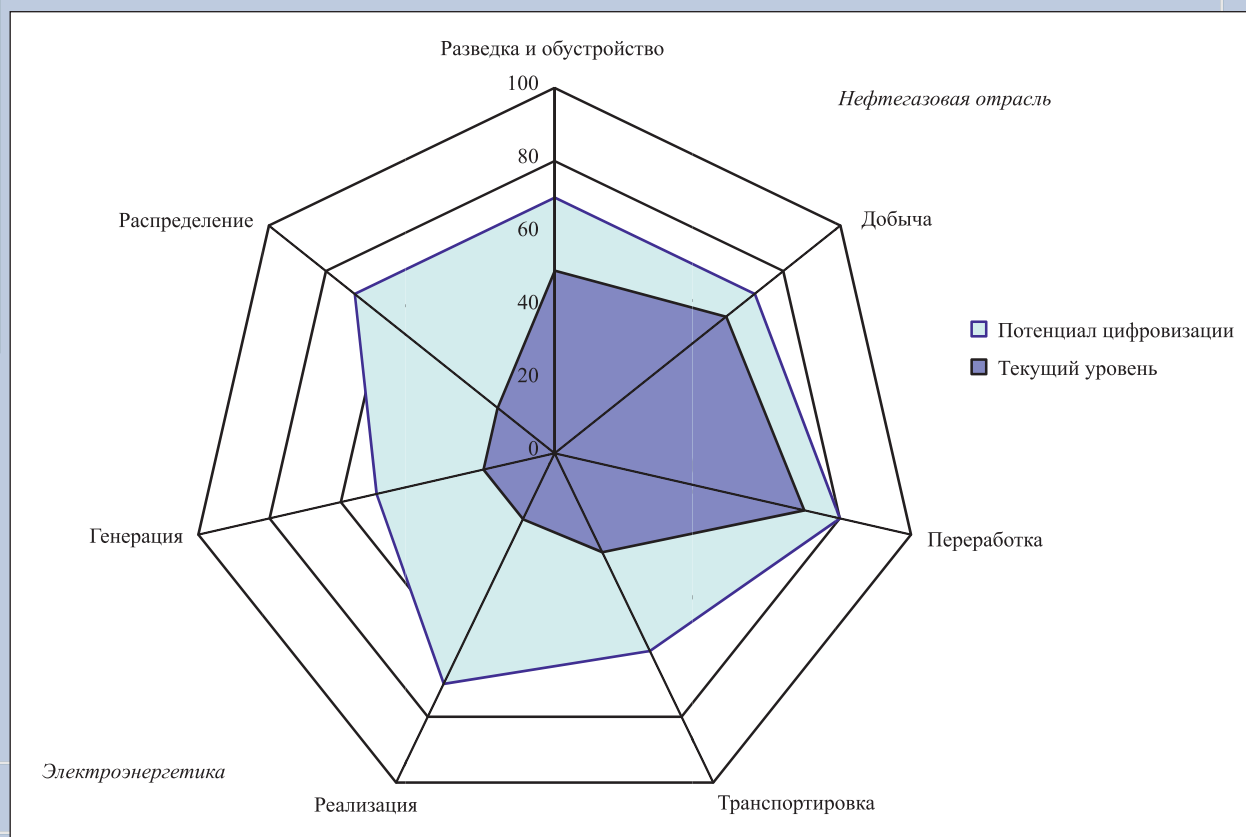


Рис. 4. Потенциал цифровизации в энергетике



Таблица 2

Энергетические парадигмы [4]

Действующая (доминирующая) энергетическая парадигма	Наступающая энергетическая парадигма
Доминирование источников электроэнергии на основе углеводородного топлива	«Чистая энергия» возобновляемых источников энергии. Глубокая децентрализация производства энергии. Рост роли электроэнергии в структуре потребления топливно-энергетических ресурсов
Крупные вертикально интегрированные энергетические компании с мощными энергоблоками, крупными месторождениями, большими перерабатывающими установками	Децентрализованные рынки, частные инвестиции
Централизованные электрические сети	Интеллектуализация базовой инфраструктуры, развитие технологий «умных» сетей (<i>Smart Grids</i>)
Однонаправленность потоков электроэнергии — от генератора к потребителю	Переход потребителей к активным моделям поведения (активный потребитель в центре энергосистемы)
Одновременность процессов производства и потребления электроэнергии	Технологии накопления энергии — энергия как «складируемый» товар. Рост эффективности использования энергии
Широкое использование органических топлив в промышленности и транспорте	Углубление электрификации промышленности и транспорта

- Изменение модели поведения потребителей и появление просьюмеров (потребителей и производителей энергии в одном лице). Потребление становится все более мобильным и гибким. Потребители могут быть поставщиками электроэнергии и конфликтуют с нормами традиционного регулирования рынка электроэнергии, требуют «энергетической демократии» (*Energy Democracy*).
- Распространение новых финансовых технологий. Появление новых технологий в финансовом секторе (*Blockchain, Smart Contract, Decentralized Autonomous Organizations*) создает возможности для масштабного привлечения частных инвестиций в энергетику, монетизации потребительских сервисов, формирования различных практик энергообмена.

1. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ: РЕВОЛЮЦИЯ ИЛИ ЭВОЛЮЦИЯ

Согласно Программе «Цифровая экономика Российской Федерации», «цифровая экономика — хозяйственная деятельность, ключевым фактором производства в которой являются **данные в цифровой форме**», обеспечивающие рост производительности труда. Революция в информационно-коммуникационных технологиях (ИКТ) дала на сегодняшний день *возможность* обеспечивать в реальном времени сбор, передачу, хранение и обработку гигантских массивов слабоструктурированных («больших») данных [5]. Цифровые (информационные) модели становятся нормой проектирования и производства, все больше виртуальных датчиков (использующих косвенные измерения, и/или комплексирование информации), вычисления и применение ИКТ стали повсеместными (*Ubiquitous Computing*). Но наличие возможности для применения недостаточно — между собираемыми об объекте или процессе данными и знаниями о нем иногда лежит целая «пропасть» [6]. Первичные данные должны быть преобразованы — превращены в более или менее структурированную информацию, из которой, желательно интеллектуальными методами, должны быть извлечены требуемые знания. Эти знания должны использоваться (иначе они бесполезны) для **управления** соответствующим объектом — осуществления целенаправленных воздействий, обеспечивающих требуемое его поведение. С этой точки зрения **цифровизацию можно рассматривать как эволюционный современный элемент цепочки «автоматизация — информатизация — цифровизация»**. А опыт успешной автоматизации и информатизации в энергетической отрасли огромен!

Действительно, идеи цифровизации проникли в нефтегазовую отрасль и стали активно обсуждаться более 15 лет назад («цифровой НПЗ» и др.) с подачи производителей оборудования и систем автоматизации; хотя в той или иной мере относимые сейчас к области цифровых технологий методы анализа данных и поддержки принятия решений применяются с середины XX в., охватывая все этапы от геологоразведки до переработки и производства энергии. Достаточно вспомнить полувековой давности работы по оконтуриванию месторождений на базе распознавания образов, применение обработки данных мультиспектральной аэро- и космической фотосъемки для целей геологоразведки, нелинейные модели технологических процессов нефтехимического производства. В нашей стране наличие транснациональных нефтяных и газовых трубопроводов, единой электроэнергетической системы рекордной протяженнос-

ти обусловило еще в конце прошлого тысячелетия создание автоматизированных систем управления ими.

Уже несколько лет в нефтегазовом комплексе употребляется понятие «интеллектуальное месторождение» (*Smart Field*) [7, 8 и др.], рассматриваемое как система автоматического управления операциями по добыче нефти и газа, предусматривающая непрерывную оптимизацию интегральной модели месторождения и модели управления добычей. Эта система позволяет управлять нефтегазовым пластом в целях увеличения показателей добычи углеводородов на основе значительного повышения эффективности разработки месторождения и максимального продления срока его эксплуатации.

Smart Field может управлять отдельными скважинами и их кустами благодаря специальной кустовой телемеханике. Также в ведении системы находятся процессы подготовки нефти и газа, включая дожимные насосные станции, факельные системы и др. Система управляет процессом поддержания пластового давления, в том числе водозаборными станциями, узлами учета воды, нагнетательными скважинами; контролирует нефтеперекачивающие станции и резервуарные парки. Применяются различные интеллектуальные и многопараметрические датчики. Интеллектуальные технологии обеспечивают удаленный доступ к географически распределенному оборудованию, позволяет диагностировать его состояние.

Один из важнейших элементов Smart Field — организация интеллектуального электроснабжения с гибкой системой распределения электроэнергии и возможностью управлять потребляемой мощностью. Верхний уровень Smart Field — автоматизированное управление всем производственным процессом, позволяющее согласовать извлечение углеводородов с сопутствующими вспомогательными процессами. Интеллектуальная система обеспечивает управляющий персонал необходимой информацией в режиме реального времени и позволяет адекватно и практически моментально реагировать на изменение параметров, гибко подстраиваться к меняющимся условиям.

В России количество цифровых месторождений достигло 26, количество цифровых скважин превысило 2 тыс. Мировой опыт эксплуатации 240 интеллектуальных цифровых месторождений показывает, что применение таких технологий позволяет сократить текущие и капитальные затраты на 10—15 % и обеспечить прирост добычи нефти и газа от 5 до 15 % [7—9 и др.].

Посмотрим на саму энергетическую отрасль как объект внедрения цифровых инноваций и приложения научно-инженерных и фундаментальных научных усилий. Доля отрасли ТЭК в ВВП России

одна из самых больших среди отраслей промышленности — 27 % в 2014 г. и 25 % в 2016 г. Но гораздо важнее тот факт, что продукция отрасли первая в цепочке создания добавленной стоимости для многих других отраслей, поэтому мультипликативный эффект от роста эффективности развития цифровой экономики в отрасли ТЭК наибольший в стране. Он влияет на ВВП страны не только напрямую, но и опосредованно, увеличивая глобальную долгосрочную конкурентоспособность других отраслей народного хозяйства.

Цифровая трансформация в энергетической отрасли охватывает практически все ее объекты и ведется уже достаточно давно. Так, в последнее время на смену АСУТП приходят интеллектуальные системы усовершенствованного управления технологическим процессом. Их отличие заключается в применении многопараметрических программируемых контроллеров, обеспечивающих управление технологическими процессами на основе анализа больших данных, поступающих от виртуальных анализаторов в режиме реального времени. Источником данных для этих анализаторов служат многочисленные датчики и устройства, контролируемые технологические процессы. Огромные массивы цифровых данных собираются, анализируются, хранятся, распространяются и утилизируются в соответствии с алгоритмами обработки и анализа больших данных. Приведем несколько **примеров внедрения** таких схем:

— проект «Газпром нефть» по анализу данных, полученных от электрических центробежных насосов более чем 1,5 тыс. скважин;

— ПАО СИБУР построило модель зависимости обрывов полипропиленовой пленки от режимов производства на основе больших данных; обрывность пленок сократилась более чем на 50 %;

— промышленный холдинг РОТЕК создал систему, прогнозирующую остаточный ресурс энергетического оборудования;

— ПАО «Газпром нефть» совместно с МФТИ создали самообучающуюся систему прогнозирования свойств пород для новых месторождений;

— ПАО «Газпром нефть» создало систему анализа больших данных, в которую включены все информационные потоки о движении товара от заводских резервуаров до продажи конечного продукта на заправке, и ряд других проектов.

Компанией РОССЕТИ разработаны основные положения концепции цифровизации электрических сетей, которые обсуждены и одобрены Президиумом Научно-технического совета в августе 2018 г. Обсуждаются проблемы и задачи применения цифровых технологий в ЭЭС [10 и др.], разработчиками оборудования предлагаются конкретные технические решения для их реализации. В октябре 2017 г. в Москве состоялась 2-я отрас-



левая конференция «Цифровая трансформация электроэнергетики России» (www.digitenergy.ru), ее организаторами выступили Минэнерго РФ и Национальная ассоциация участников рынка промышленного интернета (НАПИ).

Электроэнергетические сети достаточно подготовлены к цифровой трансформации. Электроэнергетические компании в той или иной мере уже проводят мероприятия и реализуют проекты, отвечающие задачам цифровизации ЭЭС. В частности, в статье [11] приведена информация о запуске трех пилотных проектов, реализующих цифровые технологии:

— расчет и мониторинг показателей надежности оказываемых услуг территориальными сетевыми организациями, реализуемые на базе ситуационно-аналитического центра Минэнерго РФ путем прямого сбора данных со средств телеизмерений с помощью цифровой модели сети и технологий больших данных;

— система мониторинга и анализа функционирования устройств релейной защиты и автоматики, реализуемая компаниями СО ЭЭС, ФСК ЭЭС и РТСОфт с применением риск-ориентированного подхода путем организации прямого информационного обмена между субъектами;

— система удаленного мониторинга, оценки и прогнозирования изменения технического состояния электроэнергетических объектов генерирующего оборудования и пилотная подстанция; проект реализуется компаниями РОССЕТИ и АО «Мобильные газотурбинные электрические станции».

Цифровизация теплоснабжающих систем (ТСС) рассматривается в рамках двух технологических парадигм — «Умный город» [12] и интегрированные интеллектуальные энергетические системы [13, 14]. Будучи частью инфраструктурной энергетической метасистемы, ТСС интегрирует опыт других систем. Свидетельством технологического преобразования ТСС могут служить многие процессы, происходящие в теплоснабжении. К их числу следует отнести: формирование информационно-аналитической платформы, в основе которой лежат цифровые модели реальных теплоснабжающих систем городов, расчетный и оптимизационный инструментарий [15–17] с выработкой управляющих воздействий; переход к более гибкой архитектуре систем в результате выноса пиковой мощности в районы потребления и вовлечения распределенных источников теплоснабжения [18]; все более широкое применение информационных технологий, систем передачи и хранения энергии; расширение сферы услуг в результате надстройки систем холодоснабжения на базе абсорбционных технологий преобразования энергии; трансформация системы регулирования и модели организации рынка тепловой энергии [19] и др. Они обуслов-

ливают эволюционный характер изменения поведения не только самих теплоснабжающих систем, но и потребительского сектора, что в конечном итоге выступает стратегическим драйвером трансформации в теплоснабжении и в целом в энергетике.

Наглядными представителями реализации концепции цифровой интеллектуализации систем теплоснабжения служат следующие пилотные проекты.

- Создание в крупных и средних городах согласно Федеральному Закону от 27.07.2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении» цифровых информационно-вычислительных систем для прогнозирования параметров теплоносителя, распределения нагрузки между теплоисточниками, расчета и оптимизации режимов, оценки надежности, расчета управляющих параметров. Они непосредственно интегрируются в систему диспетчерского и технологического управления, а также в систему принятия решений по развитию ТСС.
- Внедрение в ТСС г. Тюмени и других городов беспроводной системы автоматизированного учета и управления распределением тепловой энергии, объединяющей датчики и счетчики тепла в контрольных точках тепловых сетей, автоматизированных тепловых пунктов, передающие устройства информации с возможностью оперировать большими объемами данных, аналитические программаторы, обеспечивающие прозрачные взаимоотношения теплоснабжающей компании с потребителями, в целях эффективного регулирования и выстраивания процессов энергоснабжения [20].
- Формирование в Набережных Челнах одной из передовых в стране систем диспетчеризации и автоматизации управления процессами транспортировки и распределения тепловой энергии, в которую легко интегрируется цифровая информационно-вычислительная платформа, во многом идентичная интеллектуальной системе, внедряемой в г. Копенгагене (Дания). Она последовательно реализуется в виде проекта «Умное тепло» [21, 22].
- Реализация ОАО «Московская объединенная энергетическая компания» (МОЭК) в Южном административном округе Москвы проекта по внедрению технологии «Умных сетей» (*Smart Grid*) в системах теплоснабжения [23].

Цифровизация в теплоснабжении обеспечивает новый уровень внутренних коммуникационных процессов, организации и осуществления на интеллектуальном уровне технологического управления, взаимоотношений со смежными партнерами, а главное, формирует цифровую коммуникацию с потребителями тепловой энергии. Наиболее ак-

тивно в этом направлении работают ОАО «Интер РАО», ООО «Газпром энергохолдинг», ООО «Корпорация СТС», ОАО «МОЭК», ПАО «Татэнерго» и др.

Различные виды деятельности в рамках энергетической отрасли имеют различный «потенциал цифровизации» — возможность решения проблем отрасли с помощью цифровых технологий. Понятно, что цифровизация вряд ли решит проблему обледенения проводов ЛЭП или существенно повысит эффективность работы буровых установок. Сейчас в наименьшей степени цифровые технологии внедрены в области реализации продуктов нефтегазовой отрасли и распределения электроэнергии. В то же время, возможности появления новых продуктов и рынков, развития цифровых услуг для потребителей в этих областях наибольшие. На диаграмме (рис. 4, см. третью страницу обложки) представлена экспертная оценка (сделанная сотрудниками ИПУ РАН в 2018 г.) текущего уровня и потенциала цифровизации в отрасли.

Отметим, что **стремление к массовой цифровизации не должно замещать или мешать эволюционному развитию «традиционных» для энергетики исследований и технологий.**

Термин «цифровая энергетика» сегодня употребляется в двух смыслах — широком (общем) и узком смысле — как Интернет энергии.

2. ИНТЕРНЕТ ЭНЕРГИИ

Интернет энергии (*Internet of Energy, IoE*) — «экосистема» производителей и потребителей энергии, которые беспрепятственно интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией [24]. Вместо традиционной системы «производство — распределение — сбыт — потребление» появляется принципиально новая модель, где участники рынка свободно обмениваются энергоресурсами и услугами.

Главный полезный эффект от внедрения цифровых технологий и особенно платформенных решений в энергетике заключается в радикальном **повышении доступности** крупномасштабных экономических эффектов для массовых рядовых субъектов. Действительно, многофункциональные интегрированные цифровые платформы позволяют каждому человеку выполнять экономические транзакции любого содержания, объема и сложности, с минимальными издержками на поиск и выбор контрагентов, коммуникации с ними, верификацию взаимных обязательств, обеспечение конфиденциальности и др.

Соответственно, цифровое преобразование энергетики должно быть направлено на обеспечение высококачественного равного доступа массовых рядовых участников энергетического рынка к

полному спектру возможностей и функций субъектов энергетики, на базе интегрированных отраслевых цифровых платформ нового поколения. Каждый человек должен иметь возможность не только потреблять энергетические ресурсы, предоставляемые уполномоченными операторами централизованных энергосистем, но и самостоятельно генерировать, добывать, передавать, хранить, перерабатывать ресурсы. Цифровые платформы в энергетике должны также давать прямой доступ к сопутствующим услугам, таким как диспетчирование, техническое обслуживание и ремонт оборудования, проектно-изыскательские, инжиниринговые и строительные-монтажные услуги, трейдинг на рынках энергетических ресурсов, энергетический менеджмент, информационное обслуживание и др.

Например, в перспективе каждый человек, имеющий дачный участок, сможет при желании установить на нем ветряк и солнечную панель, чтобы не только покрывать собственные потребности в электричестве, но и продавать излишки на розничном рынке через имеющиеся распределительные сети. Такие возможности уже широко реализуются в Европейском союзе. Разрабатываются силовое электронное оборудование и автоматизированные системы управления, поддерживающие такую деятельность и организующие энергетическую инфраструктуру по аналогии с информационной инфраструктурой сети Интернет. В рамках «интернета вещей» (IoT) необходима разработка технологий распределенного регулирования частоты и мощности. В целом понятно, как построить и отказоустойчивую финансовую инфраструктуру такой деятельности, на основе технологии блокчейн и смарт-контрактов. Однако существенная проблема заключается в полном **отсутствии нормативной базы** для такого децентрализованного рынка прямого транзакционного обмена энергией. Цифровое преобразование энергетики, которое позволит воплотить в жизнь описанную картину, немыслимо без широкого спектра научных исследований и разработок. Возникают как совершенно новые научные задачи, например связанные с блокчейном в энергетике, так и новые аспекты традиционных задач типа моделирования для оценки устойчивости.

3. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Выделим три класса проблем — проблемы как научно-технологические задачи в области цифровой энергетики, требующие решения; проблемы-ограничения (как правило, возникающие на стыке со смежными предметными областями) и проблемы-угрозы, которые необходимо парировать.

3.1. Проблемы-научные задачи

Начнем с «атомарного» кирпичика цифровизации — «сквозной» технологии. С нее начинается сборка проектных решений под конкретные задачи, формируются технологические цифровые комплексы и платформы, происходит стыковка через соответствующие программные интерфейсы между участниками различных процессов, в том числе межотраслевых. В результате появляются эффекты.

Сквозная технология — это ключевое научно-техническое/технологическое решение, внедрение которого обеспечивает прорывное и меняющее правило игры улучшение положения отрасли на существующих рынках работ, продукции и услуг или способствует формированию новых рынков.

В контексте цифровой экономики фундаментальные научные исследования направлены на развитие сквозных технологий, находящих свое применение во всех областях энергетической отрасли. В целом, потенциальное влияние развития сквозных технологий цифровой экономики на объекты и процессы энергетической отрасли можно отобразить в виде диаграммы, приведенной на рис. 5.

Так, например, развитие интеллектуального анализа больших данных вкпе с распространением беспроводной связи и сенсорных сетей в рамках концепции Connected Enterprise выводят на качественно новый уровень процессы оценки и прогноза технического состояния оборудования, в частности, электромеханических систем (насосов, электрогенераторов, трансформаторов и др.) [25], что дает возможность существенно снизить затраты на обслуживание путем повсеместного внедрения ремонта по состоянию, в то время как технологии дополненной реальности полностью меняют сам процесс подготовки, проведения и контроля качества ремонта («цифровой монтер»).

Задачи энергоаудита и энергосбережения существенно упрощаются с применением методов интеллектуального анализа энергопотребления и векторных измерений [26], позволяющих восстановить детальную картину энергопотребления, построить топологию электрической сети и предсказать ее текущее и будущее состояния по измерениям электрических характеристик в ограниченном числе точек.

Технологии виртуальной и дополненной реальности всегда применялись в САД-системах проектирования, теперь же они широко применяются, например, и в системах охраны, в сочетании с повсеместным применением видеокамер и сенсорных сетей, снижая потребности в патрулировании территории.

Методы искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети и алгоритмы обучения с подкреплением) позволят предсказать спрос на

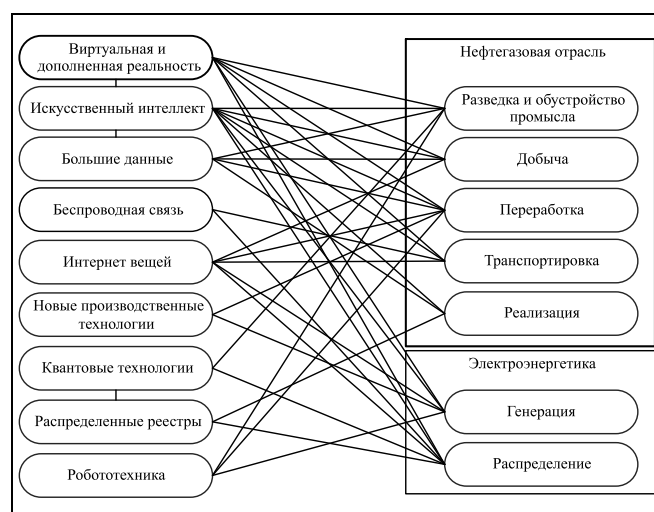


Рис. 5. Влияние развития сквозных технологий цифровой экономики на объекты и процессы в энергетике

электроэнергию даже для небольших энергорайонов и отдельных потребителей [27, 28], управлять спросом [29, 30], что позволит розничным потребителям получить доступ к оптовому рынку электроэнергии посредством интеллектуальных программных агентов (Energy Brokers) [31], а технологии распределенного реестра обеспечат надежность и безопасность расчетов.

Рост точности прогноза потребления позволит также оптимизировать загрузку генерирующего оборудования и сетевой мощности, снизить потребность в горячем резервировании, уменьшить волатильность балансирующего рынка, что в конечном итоге приведет к более стабильным ценам на оптовом рынке электроэнергии.

Применение современных вычислительных технологий и алгоритмов позволит более эффективно управлять режимом электрической сети, в частности, работать ближе к границе области устойчивости, в том числе, в перспективных электрических сетях, включающих в себя ВИЭ и распределенную генерацию.

В нефтегазовой сфере повышение точности прогнозирования потребления энергоресурсов (нефти, газа и производных) позволит оптимизировать графики добычи, передачи и хранения ископаемого топлива, что повысит операционную эффективность отрасли, снизит интегральные затраты на доставку до потребителя, повысит энергоэффективность работы оборудования.

По всей видимости, из всего спектра сквозных технологий СНТР именно технологии больших данных и искусственного интеллекта являются «ядерными» цифровыми аналитическими технологиями для всей цифровизации, а энергетическая отрасль, как отмечалось выше, является «ядерной»

отраслью для всей экономики. Поэтому синергетический эффект от развития данных технологий мультиплицируется кратно и выражается в создании предпосылок для долгосрочной глобальной конкурентоспособности отечественной промышленности в целом, в повышении качества жизни граждан.

Энергетические объекты и системы — один из ключевых предметов исследований и приложений современной теории управления — в последние 10—15 лет доля докладов, посвященных цифровой энергетике, на всемирных конгрессах Международной федерации по автоматическому управлению (около 3000 чел. со всего мира) составляет около 15—20 %, значительно обгоняя такие традиционные области как аэропейс или робототехника [5]. Нельзя забыть и об образовательном сегменте. Здесь отметим внедрение тренажеров виртуальной и дополненной реальности. Такие тренажеры могут применяться как элементы системы управления знаниями для подготовки и переподготовки персонала, для проведения имитационного моделирования сложных технологических процессов (например, проходки сложных пластов с учетом динамики изменения геофизической подосновы грунтов или ремонтных процессов энергетического оборудования и др.).

3.2. Проблемы-ограничения

К основной из этого класса проблем, общей почти для всех отраслей народного хозяйства России, относится **отсутствие национальной элементной базы** и предприятий, осуществляющих на ее основе выпуск высокотехнологичной продукции.

Второй проблемой можно считать необходимость регулярной **модернизации образовательных программ**, обеспечивающих подготовку для энергетической отрасли инженеров, владеющих современными ИКТ и сквозными технологиями.

В качестве третьей проблемы (иллюстрирующей, что применение сквозных технологий далеко не тривиально) упомянем так называемую **«энергетику больших данных»**. Действительно, давно стало окончательно ясно, что источником научных знаний, помимо теории и эксперимента, является моделирование на ЭВМ. Это кардинально поменяло отношение к суперкомпьютерным технологиям. На июнь 2011 г. самым мощным в мире суперкомпьютером был японский K computer, энергопотребление которого составляло приблизительно 5 МВт (мощность первой АЭС в Обнинске). Энергопотребление современного суперкомпьютера Summit (США) составляет около 15 МВт. Один из выходов из этой «гонки» состоит в смене вычислительной парадигмы — например, российские ученые из Сарова разработали и запатентовали оптический суперкомпьютер, чье энер-

гопотребление в сотни тысяч раз меньше, чем у полупроводниковых ЭВМ при аналогичной производительности.

3.3. Проблемы-угрозы

Сегодня человечество в рамках «цифровой революции», хотя и осознает, что, наверное, любые данные бесполезны, но не до конца понимает, что делать и как использовать их нарастающую лавину. Проблема эта не нова, так как за последнее время возник целый класс подобных проблем, и носят они цивилизационный характер. Условно их можно назвать **проблемами опережающего развития технологий**: если рассмотреть соотношение между наукой, технологиями и практикой, то в различные периоды развития человечества иногда наука инициировала развитие и последующее внедрение тех или иных технологий, а иногда последовательность была (и зачастую является в наше время!) «обратной». Технологии продолжают развиваться, причем все более быстрыми темпами. Более того, например, в последнее десятилетие скорость развития ИКТ стала опережать и практику, в том числе способности человечества по осознанию новых технологических возможностей, перспектив развития и соответствующих угроз. Именно этот эффект называют «опережающим развитием технологий» [5]. Осознать соответствующие цивилизационные проблемы, в том числе в разрезе цифровой энергетики, и научиться реагировать на них еще предстоит.

Необходимость **импортозамещения**: большая часть сложного современного цифрового оборудования в отрасль поставляется зарубежными фирмами, и часто такая поставка сопровождается заключением договора на его сервисное обслуживание. По условиям договора производитель оборудования получает полный доступ к системе мониторинга технологических параметров обслуживаемого оборудования. Оборудование оснащается активными (интеллектуальными) датчиками, которые не только собирают и передают в единый центр информацию о состоянии оборудования, но и могут управляться из такого центра, что, конечно, формирует повышенную угрозу энергетической безопасности страны. Поскольку, например, для газовых энергетических турбин около 70 % поставок приходится на долю Siemens и General Electric, а оставшиеся почти 30 % — это французские, американские и японские компании. С одной стороны, это одна из болевых точек отрасли. С другой стороны, для российского рынка это не только угроза, но и возможность, поскольку можно перевести критически важную технологическую информацию на территорию Российской Федерации, что, правда, потребует соответствующих мощностей, технологий и знаний.



Тема **кибербезопасности** выходит далеко за рамки одной только цифровой энергетики и требует отдельного глубокого анализа. Тем не менее, подчеркнем ее важные аспекты.

Прежде всего, говоря о безопасности в цифровой энергетике, необходимо понимать, что речь идет не о защите лишь информационных систем, а о безопасности информационных технологий, понимая под последней состояние информационной технологии, определяющее защищенность информации и ресурсов информационной технологии от действия объективных и субъективных, внешних и внутренних, случайных и преднамеренных угроз, а также способность информационной технологии выполнять предписанные функции без нанесения неприемлемого ущерба субъектам информационных отношений [32].

Далее, кибератаки на энергетические объекты начались далеко не вчера и закончатся отнюдь не завтра [33—35]. Достаточно вспомнить, например:

— атаку с помощью сетевого червя W32.Blaster, который стал причиной сбоя в работе электростанций в США 14 августа 2003 г. и привел к масштабному отключению электричества в электросетях Нью-Йорка и Канады;

— американо-израильскую разработку нового вида сетевого «червя» Stuxnet, поражающего контроллеры технологического оборудования, в частности центрифуг для разделения изотопов урана в Иране. И хотя официальными источниками в США данный факт не подтверждается, иранский президент М. Ахмадинежад подтвердил проблемы с технологическим оборудованием на обогатительных заводах. По имеющейся информации разработка червя заняла около двух лет. Эта программа достаточно универсальна и пригодна для нарушения работы, например, энергетических предприятий. Заразиться червем компьютер может при загрузке USB-памяти, при этом ни одна существующая на сегодня антивирусная защита его не обнаружит;

— сообщение CERT (англ. *Computer Emergency Response Team*) о том, что в октябре 2012 г. был нанесен вредоносный код в систему управления турбинами одной из электростанций США. Заражение произошло через USB, которая использовалась сотрудниками сервисной команды для обновления программ управления. И это, по свидетельству CERT, далеко не единственный случай подобного заражения энергетических предприятий США;

— «Лаборатория Касперского» в июне 2016 г. сообщила, что обнаружила уязвимость в терминале релейной защиты «Siemens Siprotec 4» — устройстве, широко используемом во всех областях энергетики для защиты сети от коротких замыканий и критических нагрузок;

— компания «Positive Technologies» в декабре 2016 г. сообщила о выявлении уязвимости в про-

граммном обеспечении «Siemens SICAM PAS» (Power Automation System), предназначенном для построения АСУТП в энергетике. Данное ПО используется на подстанциях различных классов напряжения в России, странах Европы и др.;

— «Лаборатория Касперского» и CERT опубликовали результаты исследований ландшафта угроз для систем промышленной автоматизации во втором полугодии 2017 г. Согласно отчету, в этот период две индустрии атаковали больше остальных: энергетику (38,7 % компьютеров АСУ подверглись хотя бы одной атаке) и инжиниринг/интеграторов АСУ (35,3 %).

Наконец, уже к 2007 г. хакерство перешло на коммерческую основу, в этой сфере возникла конкуренция, что способствовало быстрому росту качества вредоносных программных продуктов и падению цен на услуги в этой области. Темпы роста числа взломанных машин в мире заставляют говорить об индустриальной революции в этой сфере. С одной стороны, это стало одним из важнейших видов преступного бизнеса, с другой — уровень организации, автоматизации и разделение труда в этой отрасли достигли небывалых масштабов.

Более того, началась разработка наступательного информационного оружия. Этим занялись практически все развитые страны. Речь уже идет о подготовке и реализации информационных войн как одной из составляющих **войн гибридных**, нацеленных на поражения систем управления, приводящие к выходу из строя критических управляемых объектов, к которым относятся большинство объектов отрасли.

В последние годы ведется достаточно большое число работ по выявлению, определению и устранению критически уязвимых мест по отношению к внешним воздействиям. В статьях [36, 37] рассматривается подход, позволяющий обнаружить как систематические ошибки, так и помехи, преднамеренно внесенные в результаты кибератак. В работе [38] для выявления кибератак предложен подход, использующий иерархическое дерево отказов. Для исключения возможности кибератак на цифровых подстанциях в работах [20, 39], выделяются критические функции защит и автоматики, реализуемые не на цифровой базе, при этом обосновывается необходимость в качестве «последнего эшелона» иметь подсистемы релейной защиты и противоаварийной автоматики, не интегрированные в информационные системы, поэтому не подверженные кибератакам. Предложена имитационная подсистема, позволяющая идентифицировать кибератаки, а также выявлять потенциальные ошибки алгоритмов и программного обеспечения [40]. Отметим, что в создаваемых киберфизических энергосистемах постоянно возникают новые проблемы, требующие глубоких исследований и

нетривиальных решений по обеспечению нормального функционирования, живучести и кибербезопасности систем [41].

Отдельный и важный класс задач составляют проблемы, связанные с **устойчивостью и надежностью** энергетических систем, структура которых становится все более сложной и децентрализованной, что приводит к повышению чувствительности к локальным отказам, возможности развития каскадных эффектов. Адекватный ответ на этот вызов состоит в применении современных методов и средств анализа и управления устойчивостью [42], реконфигурации структуры и обслуживания по состоянию. С этим аспектом тесно связан будущий рост влияния электромобилей как элементов, интегрированных в систему систем «распределенная генерация — накопители энергии — IoT (цифровые датчики, актуаторы и средства коммуникации)» [43, 44].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечалось во Введении, цифровизация является и вызовом, и актуальным «окном возможностей» резкого технологического и экономического скачка. Но необходимо помнить и о другой крайней точке зрения. История науки и технологий свидетельствует, что на ранней стадии развития любой успешной науки бывает «романтический» период. Романтизму свойственны, помимо полета мысли и бурных эмоций, завышенные ожидания и соблазн простых решений (первые теоретические успехи, а также интенсивное внедрение результатов создают иллюзию универсальности и неизбежности столь же быстрого дальнейшего прогресса, после чего число популяризаторов начинает превышать число профессионалов). На смену приходит «юность» — стремление к агрессивной экспансии, зачастую стимулируемой не только потребностью в признании, но и (особенно для технологичных приложений, дошедших до бизнес-реализации) вполне меркантильными интересами. За романтическим детством и энергичной юностью наступают разочарования зрелости, а затем и упадок. Со временем продолжительность этих характерных периодов становится все меньше, и одна «научная мода» все быстрее сменяет другую.

Нередко этим пользуется бизнес, быстро убеждая потребителя, что без соответствующей модной технологии последний обречен. При этом потребители оказываются в «ложном равновесии» — вложения в новации не окупаются (да и не всегда потребитель вообще понимает, что ему с этой новой технологией делать), но отказаться от нее нельзя, иначе прослывешь отставшим от жизни со

всеми вытекающими коммерческими последствиями.

Перечисленные закономерности жизненных циклов научно-технологических направлений ощутили на себе в полной мере, например, кибернетика, синергетика, системный анализ, автоматизация/информатизация и др., причем в XX в. характерным периодом были несколько десятилетий, а в XXI — годы; продолжают ощущать теории нечетких множеств, искусственных нейронных сетей, искусственного интеллекта и многие другие научные направления, которые в свое время в той или иной степени прошли или проходят сейчас через кризис, возникший в результате неизбежного краха соответствующих завышенных ожиданий. Вступают в кризис квантовые технологии и большие данные (последний термин впервые был употреблен в 2008 г., а уже через 10 лет появились оценки «большие данные — вчерашний хайп» [Forbes, 13.07.2018]), определенных разочарований не избежит и концепция «цифровой трансформации».

Также, чтобы сохранять объективность, отметим еще одну важную проблему, которая заключается в том, что у цифровизации, искусственного интеллекта и пр. есть обратная сторона. И оппоненты цифровизации имеют весомую аргументацию. Известно, например, что:

— мультифакторная производительность (труда и капитала) от внедрения технологий растет много медленнее, чем хотелось бы;

— искусственный интеллект еще долго будет искусственным, поскольку естественный на много порядков «мощнее»;

— рост производительности распознавания объектов при глубоком обучении требует экспоненциального увеличения объема данных и зачастую ресурсов;

— обостряются социальные проблемы и др.

Да и сама цифровизация явно не может объять необъятного. Ясно, что «цифра» сама по себе не может думать за руководителя и угадывать замыслы конкурентов, не может даже разогреть стакан воды.

Мировые вызовы, с которыми столкнулась энергетика, остро поднимают вопрос о необходимости ее цифровой трансформации. Это подтверждается и проявившимися в последние годы технологическими трендами. Все виды технологий претерпевают переход от аналоговых, физических и статических к цифровым устройствам со значительно возрастающей мобильностью. Повышаются требования к доступности, надежности и качеству поставляемой энергии, растет цифровой спрос. Значительно повышается активность потребителей по обеспечению своего энергоснабжения, они приобретают характер поставщиков и потребителей энергии. Вертикально интегрированная коммуникационная структура теряет свою актуаль-



ность, все большую востребованность получает горизонтальная сетевая организация энергетической архитектуры.

Ключевой вызов заключается в том, что энергетическая инфраструктура, созданная в середине прошлого века в рамках индустриального уклада, обладает значительным моральным и физическим износом, поэтому возникает вопрос о ее реформировании с учетом перехода к постиндустриальной организации на основе интеллекта, знаний и информационных коммуникаций.

Учитывая значительный вес в ВВП и системную значимость энергетической отрасли для страны, представляется весьма важным обеспечить государственную поддержку развития и внедрения в ней сквозных технологий. Целесообразно, чтобы такая поддержка, в основном, формировалась не финансовыми методами, а путем мотивации соответствующих субъектов к применению адекватных технологий. Мотивация со стороны государства формируется путем внесения изменений в нормативную правовую базу, требующую от субъектов отрасли использовать цифровые технологии путем применения мер налогового стимулирования, льгот в таможенной и тарифной политике государства, а также кредитной политике государственных банков.

Лидирующая системообразующая роль в развитии цифровой энергетики России может и должна принадлежать Российской академии наук. В состав основных исполнителей разработки и, как минимум, экспертов по внедрению цифровых платформ и технологий в энергетический сектор, должны включаться академические институты из профильного отделения РАН, а также институты из ряда смежных отделений РАН, специализирующихся на решении вопросов информационных технологий и искусственного интеллекта, физики, математики и др.

Именно РАН, в тесном сотрудничестве с ведущими профильными вузами и отраслевыми НИИ, проектными организациями, компаниями и корпорациями (в том числе, активно включившиеся в цифровизацию Россети, Газпром, Роснефть, Транснефть, Росатом, Ростех, Ростелеком) способна предоставить всеобъемлющий фундаментальный задел для последующего освоения в рамках программ институтов развития (НТИ Энерджинет, Фонд развития промышленности и др.) и коммерческого внедрения силами ведущих системных интеграторов при научном сопровождении профильных институтов РАН.

Удобной площадкой для научно-экспертной оценки накопленного задела и постановки задач по его развитию и внедрению является Секция по цифровой энергетике и силовой электронике Совета по НТР в области энергетики, поскольку

именно эти функции возложены на Совет согласно Постановлению Правительства России № 16 от 17 января 2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воропай Н.И., Стенников В.А.* Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. — 2014. — № 1. — С. 64–78.
2. *Воропай Н.И., Осак А.Б.* Электроэнергетические системы будущего // Энергетическая политика. — 2014. — Вып. 5. — С. 60–63.
3. *Аптекман А., Калабин В., Клинов В.* и др. Цифровая Россия: новая реальность. — URL: www.mckinsey.com/ru/~/media/McKinsey/Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Russia/Our%20Insights/Digital%20Russia/Digital-Russia-report.ashx (дата обращения 04.12.2018).
4. *Цифровой переход* в электроэнергетике России. Экспертно-аналитический доклад / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина. — СПб.: Центр стратегических разработок. — Северо-Запад. — URL: <https://www.csr.ru/issledovaniya/tsifrovoy-perhod-v-energetike-rossii/> (дата обращения 04.12.2018).
5. *Novikov D.* Cybernetics: from Past to Future. — Heidelberg: Springer, 2016.
6. *Ковалев С.П.* Применение онтологий при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем // Автометрия. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 41–49.
7. *Дмитриевский А.Н., Мартынов В.Г., Абукова Л.А., Еремин Н.А.* Цифровизация и интеллектуализация нефтегазовых месторождений // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. — 2016. — № 2 (24). — С. 13–19.
8. *Еремин Н.А., Дмитриевский А.Н., Тихомиров Л.И.* Настоящее и будущее интеллектуальных месторождений // Нефть. Газ. Новации. — 2015. — № 12. — С. 44–49.
9. *Черкасов М.* Умные технологии в нефтегазовой отрасли // Control Engineering Россия. — 2015. — № 3 (57). — С. 20–22.
10. *Ремизова Т.С., Кошелев Д.Б.* Проблемы и задачи развития цифровых технологий в электроэнергетической отрасли России // Энергоэксперт. — 2018. — № 2. — С. 69–73.
11. *Медведева Е.А.* Острые углы цифровизации // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2018. — № 4 (49). — С. 18–20.
12. *Технология умных городов.* — СПб.: Центр стратегических разработок. — Северо Запад. — URL: http://csr-nw.ru/files/publications/doklad_tehnologii_dlya_umnyh_gorodov.pdf (дата обращения 04.12.2018).
13. *Voropai N., Stennikov V., Senderov S., et al.* Modeling of Integrated Energy Supply Systems: Main Principles, Model, and Applications // Journal of Energy Engineering. — 2017. — Vol. 143, iss. 5. — DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443.
14. *Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhienko E.A.* Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy // Studies on Russian Economic Development. — 2017. — Vol. 28, N 5. — P. 492–499.
15. *Алексеев А.В., Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г.* и др. Современное состояние и опыт применения ИВС «АНГАРА» для решения задач проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления системами водоснабжения / под ред. Н.Н. Новицкого. — Новосибирск: Наука, 2017. — С. 340–353.
16. *Алексеев А.В., Новицкий Н.Н.* Компьютерная технология «АНГАРА» для интеграции информационного и вычислительного пространства при моделировании трубопроводных систем // Научный вестник НГТУ. — 2017. — № 2. — С. 26–41.
17. *Stennikov V.A., Barakhienko E.A., Sokolov D.V.* Use of Multi-level Modeling for Determining Optimal Parameters of Heat

- Supply Systems // Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 64, N 7. — P. 518–525.
18. *Стенников В.А., Жарков С.В.* Эффективные направления технической политики в энергоснабжении // Известия РАН. Энергетика. — 2017. — № 5. — С. 19–31.
 19. *Стенников В.А., Пенковский А.В., Хамисов О.В.* Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 10–18.
 20. *Тюмень* — единственный в России город с «Умной теплотсетью». — URL: <http://uralpolit.ru/news/tyumen/24-10-2017/123900> (дата обращения 04.12.2018).
 21. *Волков Д.А., Малкин В.В., Черкасова О.А.* и др. О системе теплоснабжения города Набережные Челны // Новости теплоснабжения. — 2017. — № 3. — С. 17–21. — URL: www.rosteplo.ru/nt/199 (дата обращения 04.12.2018).
 22. *Надежное и экономичное снабжение теплом своих потребителей.* — URL: <http://leo-mosk.livejournal.com/3883960.html> (дата обращения 04.12.2018).
 23. URL: <http://www.energsovet.ru/news.php?zag=1378450211> (дата обращения 04.12.2018).
 24. *Kafle Y.R., Mahmud K., Morsalin S., Town G.* Towards an Internet of Energy // Proc. of the 2016 IEEE Int. Conf. on Power System Technology (POWERCON). IEEE, 2016. — P. 1–6.
 25. *Li J., Tao F., Cheng Y., Zhao L.* Big Data in Product Lifecycle Management // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 81, N 1. — P. 1433–3015.
 26. *Faustine A., Mvungi N.H., Kajjage S., Michael K.* A Survey on Non-Intrusive Load Monitoring Methods and Techniques for Energy Disaggregation Problem // arXiv:1703.00785.
 27. *Hosein S., Hosein P.* Load Forecasting using Deep Neural Networks // Proc. of IEEE ISGT Conference. IEEE, 2017. — P. 1–5.
 28. *Kaytez F., Taplamacioglu M.C., Cam E., Hardalac F.* Forecasting Electricity Consumption: A Comparison of Regression Analysis, Neural Networks and Least Squares Support Vector Machines // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. — May 2015. — Vol. 67. — P. 431–438.
 29. *Бурков В.Н., Губко М.В., Новиков Д.А.* Организационные механизмы управления в электроэнергетике / Управление развитием крупномасштабных систем. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. — С. 261–278.
 30. *Гребенюк Г.Г., Ковалев С.П., Крыгин А.А., Середа Л.А.* Организация энергоменеджмента и планирование электрической нагрузки домохозяйств // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2015. — № 3. — С. 22–27.
 31. *Chen T., Su W.* Indirect Customer-to-Customer Energy Trading with Reinforcement Learning // IEEE Trans. on Smart Grid (Early Access). — 18 July 2018. — DOI: 10.1109/TSG.2018.2857449 (дата обращения 04.12.2018).
 32. *Калашников А.О., Ермилов Е.В., Чопоров О.Н.* и др. Атаки на информационно-технологическую инфраструктуру критически важных объектов: оценка и регулирование рисков. — Воронеж: Научная книга, 2013.
 33. *Логонов Е.Л., Райков А.Н.* Сетевые информационные атаки на системы управления энергетическими объектами критической инфраструктуры // Теплоэнергетика. — 2015. — № 4. — С. 3–9.
 34. *Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.* Повышение надежности комплексов противоаварийной автоматики и релейной защиты в условиях кибератак // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — 2017. — Вып. 68. — С. 274–282.
 35. *Caviglione L., Gaggero M., Cambiaso E., Aiello M.* Measuring the Energy Consumption of Cyber Security // IEEE Communications Magazine. — 2017. — Vol. 55, iss. 7. — P. 58–63.
 36. *Колосок И.Н., Коркина Е.С.* Роль задачи оценивания состояния в обеспечении кибер-физической надежности интеллектуальной энергосистемы // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — 2016. — Вып. 67. — С. 386–395.
 37. *Колосок И.Н., Гурина Л.А.* Определение показателя уязвимости к кибератакам задачи оценивания состояния по данным SCADA и синхронизированным векторным измерениям // Электротехника. — 2017. — № 1. — С. 52–59.
 38. *Колосок И.Н., Гурина Л.А.* Повышение достоверности информационных потоков данных синхронизированных векторных измерений // Междунар. науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем». — СПб., 2017. — С. 915–921.
 39. *Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.* Влияние кибербезопасности объектов электроэнергетики на надежность функционирования ЭЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — 2016. — Вып. 67. — С. 377–385.
 40. *Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я.* Обеспечение работоспособности комплексов противоаварийной автоматики и релейной защиты в условиях кибератак // Междунар. науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем». — СПб., 2017. — С. 931–939.
 41. *Массель Л.В., Вороний Н.И., Сендеров С.М., Массель А.Г.* Кибербезопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России // Вопросы кибербезопасности. — 2016. — № 4. — С. 2–10.
 42. *Yadykin I.B., Kataev D.E., Iskakov A.B., Shipilov V.K.* Characterization of Power Systems near their Stability Boundary using the sub-Gramian Method // Control Eng. Practice. — 2016. — Vol. 53. — P. 173–183.
 43. *Kabalci Y.* A Survey on Smart Metering and Smart Grid Communication // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — Vol. 57. — P. 302–318.
 44. *Nefedov E., Sierla S., Vyatkin V.* Towards Electric Vehicles Integration to Distributed Energy Resources of Prosumer // Proc. of IEEE 15th Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN). IEEE, 2017. — P. 769–772.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Б. Ядыкиным.

Вороний Николай Иванович — чл.-корр. РАН, науч. руководитель Института, зав. отделом, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ voronai@isem.irk.ru,

Губко Михаил Владимирович — д-р физ.-мат. наук, зам. директора, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ mgoubko@mail.ru,

Ковалев Сергей Протасович — д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ kovalyov@nm.ru,

Массель Людмила Васильевна — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ massel@isem.irk.ru,

Новиков Дмитрий Александрович — чл.-корр. РАН, директор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ novikov@ipu.ru,

Райков Александр Николаевич — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ alexander.n.raikov@gmail.com,

Сендеров Сергей Михайлович — д-р техн. наук, зам. директора, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ ssm@isem.irk.ru,

Стенников Валерий Алексеевич — чл.-корр. РАН, директор, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, ✉ SVA@isem.sei.irk.ru.

*Поступила 23.11.2018.
Принята к публикации 12.12.2018.*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕЩАНИЙ В МАЛЫХ ГРУППАХ.

Ч. 2. Нестандартные подходы к проблеме

Ю.В. Сидельников, А.В. Ряпухин

Систематизированы основные подходы к повышению эффективности служебных совещаний. Рассмотрены нестандартные подходы к проблеме повышения эффективности совещаний в малых группах, противопоставляя их традиционным подходам, описанным в первой части работы. Сделан акцент на учет психологии малых групп, применение методов их стимулирования и методов теории принятия групповых решений. Представлен обзор разновидностей совещаний. Перечислены возможные темы исследований, направленных на повышение эффективности совещаний.

Ключевые слова: совещание, эффективность проведения, разновидности совещаний, новые направления, исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Современные предприятия существуют в постоянно меняющемся мире. Для сохранения жизнеспособности предприятия следует изучать изменения быстрее, чем это могут сделать конкуренты. Необходимо уметь прогнозировать, принимать эффективные решения и реализовать их, чтобы оказать определенные корректирующее воздействия на предполагаемые события. Стандартным инструментом для этого служат совещания. Но как повысить их эффективность? Существуют проверенные временем приемы, позволяющие повышать эффективность проведения совещаний. Один из известных российских специалистов в этой области указывает на следующие [1]: четко спланировать совещание; иметь ясную, прогнозируемую и достижимую цель; строго подчинить весь процесс выработанной заранее повестке дня и регламенту; принять решения по всем вынесенным на обсуждение вопросам. Но достаточно ли этого? Если, да, то почему существует четкая позиция ряда руководителей и даже специалистов по управлению, выраженная П. Друкером. Именно он, отражая позицию большинства руководителей и управленцев, говорит: «Давайте либо совещаться, либо работать. Невозможно делать и то, и другое сразу» [2]. Мы исходим из другой позиции. Можно и нужно проводить совещания, но их надо не просто готовить, но и подбирать наиболее эффективную

их разновидность для данной обсуждаемой проблемы при подготовке и принятии решений в конкретной ситуации. Для этого желательно применять как традиционные, так и нестандартные подходы к проблеме повышения эффективности совещаний. Мы выделяем две основных цели совещания: принятие решений малой группой и содействие их успешной реализации в рамках данного коллектива.

Необходимость настоящей работы обусловлена низкой эффективностью проведения совещаний.

Постановка задач исследования. В первой части данной статьи [3] была введена новая трактовка понятия *совещание* для малой группы участников, рассмотрены базовые гипотезы исследования, представлен аналитический обзор традиционных подходов к решению проблемы повышения эффективности совещаний, включая модели принятия решений на предприятиях и организациях.

Цель настоящего исследования состоит в систематизации основных сведений о подходах к повышению эффективности подготовки и проведения служебных совещаний и разработке на ее основе соответствующих предложений, а также в определении перспективных направлений дальнейших исследований. Из цели исследования вытекают следующие задачи.

- Подготовка аналитического обзора основных разновидностей совещаний, проводимых малой группой специалистов в целях подготовки и

принятия решения (акцентируя внимание на процедурном аспекте и выявлении недостатков и достоинств каждой разновидности совещаний).

- Подготовка краткого аналитического обзора нестандартных подходов к проблеме повышения эффективности совещаний, проводимых малой группой специалистов (акцентируя внимание на психологии малых групп, методах стимулирования малых групп и команд, а также теории принятия групповых решений).
- Подготовка предложений по повышению эффективности проведения совещаний.
- Определение возможных новых тем исследований, направленных на повышение эффективности совещаний.

1. ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ СОВЕЩАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ МАЛОЙ ГРУППОЙ СПЕЦИАЛИСТОВ

Невысокая эффективность традиционных совещаний заставила исследователей многих стран искать пути их совершенствования и подыскивать наиболее подходящие, т. е. уходить от привычных разновидностей совещаний. Кратко опишем некоторые из них¹ и укажем их недостатки и достоинства.

Метод синектики (англ. *Synectics*) [4, 5]. Краткая суть: в синектике, в отличие от мозгового штурма, целенаправленно обучают самому методу с тем, чтобы подготовить так называемых синекторов (специалистов, занимающихся поиском новых решений). Количественный состав группы синекторов 5—7 чел. Руководить ею должен опытный специалист, хорошо знакомый с основами метода. Обсуждение в группе часто начинается не с формулировки задачи, а с рассмотрения сущности принципа, лежащего в основе исследуемого процесса. Преждевременно четкая формулировка задачи, считают синекторы, приводит к затруднениям в поиске оригинальных решений. Решение задачи начинается с внесения изменений в ее постановку, предложенную заказчиком. После того, как сформулирована уточненная постановка задачи, участники группы, пользуясь набором приемов, систематически пытаются взглянуть на проблему с различных точек зрения и тем самым преодолеть «психологическую инерцию». Основными творческими приемами в синектике служат различные виды аналогий: прямая, личностная (эмпатия), символическая и фантастическая.

¹ Полное описание разновидностей совещаний дано в книге [6].

В процессе реализации метода участники группы заняты полный рабочий день в течение нескольких недель — вплоть до решения проблемы.

Недостатки

- Организационная сложность — инструменты и механизмы техники, хотя и кажутся простыми, но организация синектики на профессиональном уровне представляет собой довольно сложное мероприятие.
 - Занимает относительно много времени.
- #### *Достоинства*
- Можно применять для решения относительно сложных проблем.
 - Универсальность.
 - Совершенствование индивидуальных качеств (интуиция, воображение).

Метод конференции идей (англ. *The Conference of Ideas*) [7]. Эта разновидность совещания применяется руководителем в условиях дефицита информации и времени. Ее главное и единственное отличие — строгая последовательность высказывания своего мнения.

Цель: максимально использовать опыт, знания и фантазию всех без исключения участников совещания для решения проблемы.

Суть: строгое выполнение каждым участником определенных правил, одно из которых заключается в заранее установленной очередности выступлений от «юнга» до «капитана»: от младшего к старшему; успех работы совещания зависит главным образом от умения руководителя — «капитана» — создать спокойную деловую обстановку, стимулирующую участников на активный поиск решения проблемы.

План действий

1. Объявить участникам очередность выступлений.
2. Четко сформулировать проблему и представить ее в форме, наиболее удобной для участников.
3. Заслушать каждого участника о путях решения проблемы (этап «выдвижение идей»).
4. Отобрать 2—3 идеи для проработки.
5. Критика отобранных идей (этап «критика идей»).
6. Защита и развитие идей, подвергнутых критике (этап «защита идей»).
7. Выбор руководителем предложений, которые помогут лучше решить проблему.
8. Реализация решений.

Недостатки

- Метод предназначен для решения сравнительно простых задач.
- При возникновении новой идеи после того, как очередь участника прошла, ему нельзя ее высказать.



Достоинства

- Легкость освоения метода и простота в обращении.
- Незначительные затраты времени на проведение.

Метод номинальных групп² (НГ), (англ. *Nominal Group Technique*) [8, 9] представляет собой технологию групповой деятельности, определенным образом структурированной и направленной на совместное принятие решений. Под понятием *группа* имеется в виду некая совокупность индивидов, работающих вместе, но не вступающих в вербальное взаимодействие в течение некоторого периода времени. Процедура проведения метода НГ контролируется модератором, ответственным за сбор всех предложений и мнений и состоит из ряда этапов. Для реализации полного пошагового процесса потребуется 2–3 ч. На первых этапах все участники НГ обладают равными возможностями высказывать свои предложения и идеи. Впоследствии каждая идея обсуждается по отдельности, проводится голосование, по итогам которого выводится общее решение группы. Основная цель метода НГ — выявление взглядов группы на определенную проблему с последующим получением ее общего группового решения.

Этап 1. Номинальная фаза, или фаза молчания: индивидуальное формулирование идей членами группы (примерная продолжительность 10–20 мин).

Этап 2. Обмен идеями и предложениями по кругу (*round-robin*): обратная связь — озвучивание идей, сформулированных на первом этапе (примерная продолжительность 20–40 мин).

Этап 3. Фаза обсуждения и разъяснения: пояснение идей: вопросы от группы (примерная продолжительность 20–40 мин).

Этап 4. Фаза голосования. С помощью процедуры индивидуального ранжирования устанавливается относительная важность или приоритетность каждого элемента ранжирования.

Этап 5. Фаза обсуждения результатов голосования, составление итогового рейтинга (примерная продолжительность 20–40 мин).

В работах [8, 9] рассмотрены особенности и ограничения метода НГ.

Недостатки

- Часто бывает сложно убедить людей впервые воспользоваться методом НГ. Это относится как к участникам (респондентам), так и заказ-

чикам. Обычный вопрос: «Зачем нужна вся эта структура?».

- Влияние участников друг на друга. Давление группы влияет на искренность ответов респондентов во время фазы обсуждения.
- Влияние модератора хотя и значительно меньше, чем, например, в фокус-группах, однако нужен модератор, имеющий опыт проведения подобных совещаний и свободно владеющий всеми стадиями процесса.
- Сопrotивление структуре. Некоторые участники способны лучше воспроизвести свои идеи в фазе обсуждения, чем в фазе индивидуальной работы. Поэтому важно обращаться к каждому участнику после прохождения очередной фазы. Фаза обсуждения важна для оценки числа и «веса» (важности) рассматриваемых проблем и для сбора большего количества информации о мнениях респондентов. Если давать равное время на обсуждение всех этапов, процедура затянется, участники потеряют интерес к проблеме.
- Неравное количество времени, отводимое на обсуждение того или иного этапа, порождает неоднородность ответов (результатов). Этот факт затрудняет последующие сравнения и делает их потенциально ненадежными. Очевидно, что, хотя с помощью метода НГ можно идентифицировать проблемы, которые являются релевантными данной целевой группе в фиксированный момент времени, результаты должны быть проинтерпретированы с осторожностью, особенно если они собраны за длительный период времени от различных групп участников [10].

Достоинства

- Устраняет влияние статусных различий.
 - Не допускает конкуренции и давления конформизма.
 - Позволяет избежать оценивания участниками мнений друг друга (деперсонализировать идеи).
 - Предупреждает поляризацию группы.
 - Метод был специально разработан в целях повышения продуктивности и эффективности совещаний руководителей и менеджеров среднего и высшего звена.
 - Содействует обеспечению равного участия респондентов.
 - Поощряет каждого участника основывать (надстраивать) свое мнение на мнениях других [10].
- Метод лицом к лицу** (англ. *Face to face*). Краткая суть: опрос проводится в группе экспертов от 5 до 30 чел. Обсуждается единственная проблема. Руководство опросом со стороны организатора почти исключено. Он должен лишь следить за тем, чтобы каждый эксперт участвовал в дискуссии и предла-

² По сути, этот метод представляет собой технологию групповой деятельности, определенным образом структурированной и направленной на совместное принятие решений.

гал свои оценки. Формально время проведения заседания не ограничено, но практически составляет 20–40 мин [11, с. 162].

Недостатки

- Эксперты анализируют лишь часть имеющейся в их распоряжении информации.
- Обсуждение часто уходит в сторону от основной цели экспертизы: много времени тратится на не относящиеся к делу разговоры («семантические шумы»).
- Наибольшее влияние на выработку группового суждения оказывают наиболее разговорчивые индивиды; со стороны других экспертов, напротив, проявляется стремление к конформизму.

Достоинства

- Простота реализации и быстрота решения простейших задач.
- Возможность немедленно задать дополнительные вопросы.

Метод комиссий (англ. *Expert-Commission Method*) [12] заключается в том, что группа экспертов многократно собирается для обсуждения одного и того же вопроса. Как и в методе «лицом к лицу», организатор экспертизы не руководит обсуждением, а лишь обеспечивает активную работу каждого эксперта. Предварительно разрабатывается программа обсуждения. Группа экспертов подбирается «волевым путем» — так называемым способом назначения. Обычно это 10–12 чел. Для получения качественного результата в форме общего суждения экспертов предусмотрен свободный и очный обмен мнениями между экспертами, т. е. открытое общение. Средствами обеспечения открытости могут служить, в частности, личные высказывания экспертов и, по возможности, отказ от обезличенных суждений типа «обычно считается, что...» или «говорят, что...». Конечно, открытость предполагает не только готовность заявить собственную позицию, но и желание и умение воспринять позиции других экспертов. В рамках обсуждения проблемы экспертам необходимо следовать принципу психологической безопасности: позиция эксперта и те суждения, которые он высказывает, не должны оскорблять достоинство других или превращать обсуждение проблемы в способ утверждения собственного превосходства; важно взаимное стремление и готовность экспертов к рассмотрению и решению обсуждаемой проблемы.

Недостатки

- Необходимость обучения организаторов и экспертов.
- Группа экспертов всегда подбирается «волевым путем».
- Группа экспертов многократно собирается для обсуждения одного и того же вопроса.

Достоинства

- Открытое общение экспертов.
- Программа обсуждения разрабатывается предварительно.

Процедура суда [13]. Краткая суть: аналогия с судебным гражданским процессом, поскольку в нем ярко выражены принципы равенства сторон, диспозитивности и необходимости сторон доказывать обстоятельства, на которые они ссылаются. На подготовительном этапе экспертам предлагается дать свои оценки. Эксперты, давшие самые крайние оценки, будут соответственно играть роли Истца — защитника рассматриваемой альтернативы — и, выступая, приводят доводы в ее пользу, и Ответчика, который пытается привести доводы против рассматриваемой альтернативы. Эксперты, давшие оценки, наиболее близкие к середине, будут играть роль судей и призваны регулировать ход экспертизы и выносить окончательное решение. Число экспертов-судей может варьироваться в зависимости от анализируемой проблемы, но обязательно должно быть нечетным. Эксперты, давшие промежуточные оценки, будут играть роли экспертов-криминалистов и свидетелей. Они же должны разбить анализируемую проблему на несколько подпроблем. Целесообразно составить некое подобие Гражданского процессуального кодекса. На заключительном этапе экспертам по проблеме необходимо обосновать экспертам-судьям свои противоположные позиции. После приведения всех имеющихся у сторон доводов, эксперты-судьи удаляются для вынесения своего объективного, обоснованного и независимого решения. В зависимости от сложности анализируемой проблемы и ряда других факторов может быть предусмотрена процедура обжалования решения. Число заседаний может варьироваться в зависимости от сложности рассматриваемого вопроса.

Недостатки

- Отсутствие анонимности может приводить к достаточно сильным проявлениям конформизма экспертов, а публичность может приводить к «упертости» в ранее высказанной позиции.
- Различная активность экспертов, не всегда коррелированная с их компетентностью.

Достоинство

- Открытая дискуссия.

Ролевые игры [14, 15]. Когда необходимо уточнить рыночную ситуацию или просчитать действия конкурентов, могут быть полезны ролевые игры как некая разновидность совещаний, эффективно применяемая на практике [16]. Например, в 2001 г. компания «Philco» (США), производящая хозяйственные товары, применила этот метод при подготовке к запуску нового механизма стимули-



рования ритейлеров, основанного на инновационной для этого рынка системе скидок, зависящих от объемов продаж. Успех этого начинания зависел, прежде всего, от содействия со стороны менеджеров магазинов, в которых продавалась продукция компании. Руководство «Philco» параллельно с опросом экспертов провело ряд ролевых игр в десяти группах, участники которых играли роли ритейлеров. Как выяснилось уже после успешного введения системы в действие, игры показали более высокую точность прогнозирования действий менеджеров магазинов, чем экспертные оценки.

Большинство специалистов высказалось против нового механизма, в то время как при проведении ролевых игр успех правильно предсказали восемь групп из десяти [15].

Недостатки

- Наставник теряет контроль над содержанием и процессом обучения.
- Упрощения могут вводить в заблуждение.

Достоинства

- Помогает участнику выразить свои чувства.
- Проникнуться чувствами окружающих и понять их мотивацию.
- Высвечивает общие социальные проблемы и динамику группового взаимодействия.
- Является эффективной и мотивирующей процедурой, поскольку подразумевает действие.
- Обеспечивает быструю обратную связь и участнику, и ведущему.
- Устраняет пропасть между обучением и реальными жизненными ситуациями.
- Изменяет установки.
- Учит контролировать чувства и эмоции.
- Помогает обсуждать личные вопросы и проблемы [17].

Телевизионные совещания [18]. В Западной Европе и США широко применяются телевизионные совещания посредством внутриучрежденческих телевизионных сетей. Качество решений, полученных на телесовещаниях, выше, чем на обычных, благодаря предельной достоверности происходящего. Например, благодаря общению «глаза в глаза» (крупные и средние планы позволяют детально анализировать душевное состояние каждого участника), быстрому предъявлению на экране нужных документов, материалов, а также видеокадров производственных ситуаций.

Недостаток

- Организации необходимо закупать и монтировать специализированное оборудование для проведения телеконференций [18].

Достоинства

- Дает возможность ее участникам, не собираясь в одном зале и не отрываясь от своих рабочих

мест, общаться, причем участники конференции могут видеть и слушать друг друга, обсуждать поставленные вопросы и дискутировать.

- Экономия средств, поскольку руководитель и специалисты не оставляют своих рабочих мест, а предприятие высвобождается от транспортных и других расходов, связанных с командировками.
- Высокая оперативность организации телеконференции, не надо согласовывать с участниками удобное для них место и время, учитывать ограничения, связанные с расписанием движения транспорта, возможностями размещения в гостиницах, наличием соответствующего помещения и др.
- Обсуждение проблемы может быть организовано практически немедленно после ее возникновения.
- Может принять участие большее число работников, чем в обычной конференции.
- Каждый участник конференции может воспользоваться любыми материалами — графиками, диаграммами, схемами, плакатами, текстами и др.
- Графические данные могут одновременно появляться на телеэкранах, в случае необходимости в них можно вносить исправления и дополнения.
- При этом те или другие ситуации могут повторяться, а в ходе обсуждения выполняться необходимые расчеты; если есть связь с разными базами данных, то участники телеконференции могут оперативно воспользоваться любой справочной информацией [20].

Метод интеграции решений [19, 20] несколько формален, но по своей сути схож с методом комиссий. Он заключается в выработке совместного решения проблемы на основе выявления сильных сторон отдельных решений и их объединения. Метод реализуется в несколько этапов.

Сначала экспертам предлагается задача, и они рассматривают и решают ее независимо друг от друга.

Затем в заранее подготовленный формуляр эксперты заносят свои индивидуальные решения, т. е. трактовку анализируемой ситуации или прогноз развития событий.

На следующем этапе эксперты совместно обсуждают задачу и все предложенные решения с целью выявить сильные стороны каждого отдельного решения, которые также фиксируются в формуляре.

При представлении индивидуальных решений возможны вариации — либо каждое решение представляется автором и подробно аргументируется,

либо соблюдается анонимность решений, чтобы избежать давления авторитетов.

После того как обсуждены все решения и определены сильные стороны каждого из них, вырабатывается синтезированное решение на основе комбинирования преимуществ отдельных решений [21].

Недостатки

- Метод формальный [22].
- Отсутствие анонимности.

Достоинства

- Возможность обсуждения экспертами каждого предложенного решения и выявление его наиболее сильной позиции.

Японская (кольцевая) система принятия решений [23, 24]. В некоторых источниках эта разновидность совещания получила название «Совещания без совещаний» [25], иногда на русском языке название метода транскрибируется как «кингисё» [26, 27].

В противоположность европейцам, которые принимают решения большинством голосов, японцы предпочитают предварительные увязки, совещания и неформальные переговоры. Подобная процедура, по их мнению, приводит к единодушию, что выливается в согласованные действия [25, 28].

С учетом ожидаемой от низов инициативы организуется процедура подготовки, обсуждения и санкционирования управленческих решений, которая носит название *ринги*. Процесс принятия решения по системе ринги развивается следующим образом:

1) руководитель в общих чертах определяет проблему и передает ее в письменном виде на детальный анализ в сектор или в секцию; кроме того, он подготавливает список должностных лиц, которые должны принять участие в поиске наилучшего решения проблемы и перечень материалов, которые нужны для решения проблемы;

2) его секретарь размножает эти материалы и рассылает их лицам из подготовленного списка (как правило, приглашаются те специалисты, чье мнение не совсем ясно руководителю); кроме того, всем этим участникам передается бланк с письменной формулировкой проблемы и просьбой изложить свою точку зрения;

3) руководитель назначает одного из своих заместителей ответственным за сбор, обобщение и анализ предложений участников, который должен подготовить документ «рингисё» с предложениями и выводами для руководителя по рассматриваемой проблеме;

4) заместитель при подготовке рингисё поочередно обсуждает и уточняет с каждым участником из списка его мнение, а затем согласует их;

5) каждый из участников должен: рассмотреть бланк с письменной формулировкой проблемы; дать свои замечания в письменном виде; завизировать его (поставить личную печать) и возвратить заместителю; конечно, специалисты выбирают свои решения в соответствии с индивидуальными предпочтениями, и если они не совпадают, то возникает вектор предпочтений, который распределяют с помощью одного из принципов:

а) большинства голосов — выбирается решение, имеющее наибольшее число сторонников;

б) диктатора — за основу берется мнение одного лица (этот принцип характерен для военных организаций, а также для принятия решений в чрезвычайных обстоятельствах);

в) принцип Курно — в том случае, когда коалиций нет, т. е. предлагается число решений, равное числу экспертов;

г) принцип Парето — при принятии решений, когда все эксперты образуют единое целое, одну коалицию;

д) принцип Эджворта — в том случае, если группа состоит из нескольких коалиций, каждой из которых невыгодно отменять свое решение; (если в ответах подчиненных много предложений, противоречащих друг другу, то целесообразно составить новое уточненное задание и разослать его по второму кругу (каждый из участников тратит на такое совещание максимум 15 мин и не отрывается от своей непосредственной работы);

б) заместитель докладывает отработанный и завизированный документ руководству, после чего документ вступает в силу;

7) руководитель принимает решение на основе полученного доклада.

Таким образом, администрация только намечает проблему, а конкретная ее разработка и выдвижение предложений по ее решению делегируются «низам». Многочисленные визы (печати) на рингисё свидетельствуют о том, что заинтересованные лица ознакомились с проблемой и выразили свое мнение.

Впоследствии, когда решение будет принято, не нужно будет прилагать усилия для его популяризации и продвижения по каналам исполнения. Эта работа уже сделана в процессе обсуждения и согласования. Решение, таким образом, воспринимается как плод совместной групповой деятельности. В «ринги» главное заключается в том, чтобы еще до принятия решения «пропитать» сознание всех имеющих к нему отношение работников деталями обсуждаемой проблемы.

Когда этот документ поступает к руководству, он успевает получить одобрение всех заинтересованных лиц, что минимизирует вероятность разногласий и конфликтов в организации.



Когда высшая инстанция налагает на рингисё вето, это делается в такой форме, чтобы все те, кто готовил документ и поставил на нем визу, «сохранили лицо». Как правило, в подобных случаях представитель руководства публично превозносит рингисё за оригинальность и перспективность выдвинутых предложений, делая при этом оговорку, что в настоящее время, к сожалению, нет возможности реализовать столь смелую инициативу. При этом добавляется, что к ней следует вернуться сразу же при возникновении необходимых условий [25].

Японцы все чаще подвергают критике процедуру «ринги». Тем не менее, они не хотят от нее отказываться и ограничиваются лишь некоторыми усовершенствованиями: сокращают число каналов распространения, стандартизируют порядок визирования и др. При этом «групповой» подход к решению проблемы, в основе которого лежит идея «распределения ответственности», остается неизменным. За решение отвечают все, т. е. группа. Происходит постепенное сокращение сферы влияния этого метода принятия решений. Это связано с рядом причин, в том числе с широким распространением планирования и методов разработки бюджета в японских фирмах. Кроме того, в большинстве японских фирм усилены полномочия отдельных лиц по принятию решений [28].

Недостатки

- Эта система затрудняет планирование, особенно стратегическое.
- Излишне компромиссный характер принимаемых решений, что может препятствовать развитию организации.
- В условиях нестабильной среды не обеспечивается оперативность принятия решений.
- Сложно выбирать принцип выбора [23].
- В условиях господства системы «ринги» отдельный работник не может свободно выступить против проекта, предложенного руководством. Ведь этот проект получил «всеобщую поддержку» при согласовании, и критика его «задним числом» выглядит неуместной, а то и аморальной. Поэтому любое предложение сверху правомерно считать директивой, которая лишь более или менее хорошо загрифована под «материал для дискуссий». Внешне обсуждение рингисё в нижних эшелонах предстает как довольно демократическая форма принятия решений. Однако не секрет, что обсуждение это несет на себе огромный груз межличностных отношений, типичных для японской культуры: традиционного почитания старших, повышенной чувствительности к авторитетам, ясного осознания каждым участником своего места в организации [28].

- Не всегда процедура обеспечивает приток новых идей и свободу мнений при обсуждении решений. Иногда в условиях жесткой иерархии и почтения к начальству подобный процесс сводится к попыткам подчиненных предугадать мнение руководителей, чем к продвижению их самостоятельной точки зрения. В таком виде система «ринги» часто превращалась в сложный и не всегда полезный механизм, отнимающий у руководителей и служащих разных рангов массу времени на согласование решений [28].
- Чрезмерная громоздкость процедуры и перегруженность ненужными сведениями.
- Не обсуждается постановка задачи [29].
- Итоговое решение готовит один человек, назначенный руководителем [29].

Достоинства

- Принимаемые решения более обоснованы и продуманы, так как тщательно обсуждены все аспекты решаемой проблемы и применен групповой метод выработки решений. Сама форма организации процесса способствует применению коллегиальных методов анализа решений, которые повышают их качество и стимулируют появление новых альтернатив.
- Вся необходимая работа по согласованию и организации выполнения решения проделана уже на предварительной стадии.
- Реализация решений проходит очень быстро и эффективно [23].
- Факт заметного психологического воздействия на работников процедуры «ринги» продолжает сохранять для фирменного руководства огромное значение. Воздействие это решительно облегчает ему агитацию персонала идеями сотрудничества труда и капитала. В рамках системы «ринги» рядовые работники проникаются иллюзиями относительно своей роли в принятии решений и, в конечном счете, застывают на позициях откровенного конформизма [28].
- В процедуре «ринги» главное заключается в том, чтобы еще до принятия решения «пропитать» сознание всех имеющих к нему отношение работников деталями обсуждаемой проблемы. Каналы, по которым проходит рингисё, пронизывают практически всю организацию как по вертикали, так и по горизонтали. Когда этот документ поступает к руководству, он успевает получить одобрение всех заинтересованных лиц, что минимизирует вероятность разногласий и конфликтов в организации.
- Впоследствии, когда решение будет принято, не нужно будет прилагать усилия для его популяризации и продвижения по каналам исполнения. Эта работа уже сделана в процессе обсуж-

дения и согласования (таким образом, воспринимается как плод совместной групповой деятельности).

- В процедуре «ринги» четко прослеживаются принципы «управления снизу», «консенсуса» и «группизма».

Метод шести шляп мышления (ШШМ) Э. де Бона [30]. В основу метода положена концепция параллельного мышления. Как правило, то или иное решение рождается в столкновении мнений, в дискуссии и полемике. При таком подходе предпочтение часто отдается отнюдь не самому лучшему из вариантов, а тому, который более успешно продвигался в полемике. При параллельном мышлении (конструктивном, по сути) разные подходы, мнения и идеи сосуществуют, а не противопоставляются и не сталкиваются лбами. Метод ШШМ помогает справиться с тремя главными сложностями — эмоциями, растерянностью и путаницей путем разделения процесса мышления на шесть разных режимов, каждый из которых представлен в виде метафорической шляпы определенного цвета. Подобное деление делает мышление более сосредоточенным и устойчивым и учит нас оперировать различными его аспектами поочередно.

Белая шляпа мышления — это режим фокусировки внимания на всей информации, которой мы обладаем: факты и цифры. Также важно сосредоточиться на возможно недостающей, дополнительной информации и подумать о том, как ее раздобыть.

Красная шляпа — шляпа эмоций, чувств и интуиции. Не вдаваясь в подробности и рассуждения, на этом этапе высказываются все интуитивные догадки.

Желтая шляпа позитивная. Надевая ее, мы думаем над предполагаемыми преимуществами, которое дает решение или несет предложение, размышляем над выгодой и перспективой определенной идеи. Важно проработать именно эту, оптимистическую сторону и попытаться выявить скрытые положительные ресурсы.

Черная шляпа — полная противоположность желтой. В этой шляпе на ум должны идти исключительно критические оценки ситуации (идеи, решения и т. д.): проявите осторожность, обратите взгляд на возможные риски и тайные угрозы, на существенные и мнимые недостатки и побудьте немного пессимистом.

Зеленая шляпа — шляпа творчества и креативности, поиска альтернатив и внесения изменений. Рассматривайте всевозможные вариации, генерируйте новые идеи, модифицируйте уже существующие и присматривайтесь к чужим наработкам, не брезгуйте нестандартными и провокационными подходами, ищите любую альтернативу.

Синяя шляпа — шестая шляпа мышления в отличие от пяти других предназначается для управления процессом реализации идеи и работы над решением задач, а не для оценки предложения и проработки его содержания. В частности, сначала формулирование целей, а в конце — подведение итогов.

Недостатки

- Главным минусом, хотя, наверное, даже не минусом, а сложностью является сама технология шести шляп. Чтобы освоить ее и с пользой научиться применять, необходимо какое-то время. Проще решать вопросы, пользуясь приемом шести шляп индивидуально, а вот в коллективе это делать намного сложнее.
- Если вы не являетесь непосредственным руководителем, инициировать этот метод на предприятии и объяснить все его преимущества — задача не простая. Большинство отечественных предприятий не готовы внедрять новшества в работу компании, требующие личной вовлеченности.
- Кроме необходимости убедить руководство в надобности данного метода, существует еще и момент серьезности его восприятия непосредственно коллективом. Кто-то может посчитать его «детским» и откажется примерять цветные шляпы (хотя никакие шляпы на самом деле надевать не надо), объяснив это тем, что он не клоун. Однако тут дело опять-таки в профессионализме ведущего (модератора, т. е. синей шляпы) [30].

Достоинства

- Мыслительная деятельность для большинства людей представляется весьма скучным занятием. Но данная система способна завлечь и сделать этот процесс своеобразным экспериментом, по завершении которого проблемы как и не бывало.
- Метод позволяет проработать задачу со всех сторон, уделяя внимание таким важным сторонам, как эмоции, анализ положительных и негативных аспектов, генерация новых идей.
- Система шести шляп позволяет отбросить все ложные утверждения, которые раньше воспринимались всерьез.
- Можно сгладить спор с оппонентом, показав с помощью метода неправильность его утверждений. А также человек получит шанс высказаться и поделиться своими соображениями. Метод ШШМ значительно упрощает поиск верных решений.
- Система позволяет замкнутым и стеснительным людям проявить себя в общем обсуждении. Им не стоит стесняться своих мыслей, даже



когда они не совпадают с мнением окружающих. Получается, что они говорят под влиянием одной из шляп, а не от себя.

- Благодаря структурированию всего процесса, исключая пустую болтовню, мышление становится целевым, логичным и сконцентрированным.
- Поскольку противоположные точки зрения не конфликтуют, а существуют одновременно, рождаются новые уникальные и интересные идеи.
- Применяя метод, человек учится концентрировать свое внимание, а также переключать его с одного вида информации на другой.
- По мнению Эдварда де Боно, его метод способен влиять на баланс нейромедиаторов в головном мозге [30].

2. КРАТКИЙ ОБЗОР ДРУГИХ НЕСТАНДАРТНЫХ ПОДХОДОВ К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕЩАНИЙ

В данном исследовании мы акцентируем внимание на тех подходах, которые обычно не связывают с повышением эффективности совещания: психологии малых групп, методах стимулирования малых групп и команд, а также теории группового выбора.

По мнению авторов учебного пособия [31], «несмотря на весьма значительный объем издающейся сегодня в России психологической литературы (особенно переводной), собственно проблематика малых групп при всей ее неоспоримой значимости остается, как ни странно, на периферии внимания отечественных издателей. Во всяком случае, минувшее десятилетие не подарило русскоязычному читателю ни одной сколько-нибудь крупной публикации в этой области». Для того чтобы перспективы изучения малых групп стали еще более отчетливы, необходимо более или менее систематически рассмотреть, в каких же основных направлениях развивалось их исследование в социальной психологии на Западе, где проблема малых групп стала основной. Но это достаточно емкая и самостоятельная задача, решить которую здесь можно лишь в общих чертах. Ранее рассматривались три основных направления в исследовании малых групп, сложившиеся в русле различных исследовательских подходов: социометрического, социологического и школы «групповой динамики», как, например, в книге [32]. Авторы работы [33] разбили основные направления в исследовании малых групп на девять крупных подходов. Эти подходы, в той или иной мере, определяли развитие групповой психологии: теорию поля; интерак-

ционистскую концепцию; теорию систем; социометрическое направление; психоаналитическую ориентацию; общепсихологический подход; эмпирико-статистическое направление; формально-модельный подход; теорию подкрепления. Сегодня к ним можно добавить еще и сформировавшееся в последние десятилетия социально-когнитивное направление [33]. Именно исследования в проблематике малых групп, в том числе и за пределами социальной психологии, например в сфере бизнеса, помогает нам определиться с видом и типом групп участников и, тем самым, с разновидностью совещаний.

Кратко рассмотрим применение методов стимулирования малых групп и команд для повышения эффективности деятельности малой группы специалистов при подготовке и принятии ими управленческих решений. Хорошие аналитические обзоры методов стимулирования малых групп и команд, мотивационных теорий, мотивации членов команды и ее виды, а также мотивации самой команды были рассмотрены в работах [34, 35]. В ряде работ были предложены новые подходы к изучению потребностей команд [36, 37]. В этих работах особое внимание было уделено изучению системы материальных и моральных стимулов, определяющих заинтересованность работника в его труде, с учетом ожидаемого вознаграждения при достижении цели. Описаны основные принципы, которыми руководитель должен руководствоваться при выборе систем и механизмов вознаграждения. Кроме того, описаны базисные элементы команды и проекта, которые необходимо учитывать руководителю для ее эффективной мотивации. Дополнительно рассмотрена связь командной и индивидуальной мотивации. Особое внимание в этих работах уделено самомотивации членов команды и команды в целом.

В некоторых разновидностях совещаний, как например, японская (кольцевая) система принятия решений рингисё, применяются элементы теории группового выбора. Именно поэтому необходимо, хотя бы кратко охарактеризовать эту научную дисциплину (англ. *Group Choice Theory*). «В рамках этой теории исследуются математические закономерности формирования решений (например, правило большинства, принцип «диктатора», оптимальность по Парето, Нэша, принцип устойчивости, расстановка приоритетов), а также их результатов. При этом под групповым выбором понимают процедуру принятия коллективного решения на основе согласования индивидуальных предпочтений членов групп. Рациональная организация процедур выработки решения, т. е. технологии работы группового ЛПР, требует учета

поведения членов группы и влияния различных факторов на это поведение (характер решаемой проблемы, последовательность высказывания мнений, условие образования коалиции, эмоциональное состояние участников и т. п.)» [38]. Основное направление в области группового выбора связано не с тем, как должен проходить процесс выбора, а с тем, какими требованиями и свойствами должен обладать результат согласования индивидуальных предпочтений в групповое предпочтение. Такой подход, несмотря на свою неполноту из-за исключения проблем поведения участников выбора, позволяет всесторонне подойти к проблеме группового выбора, включив в нее многокритериальный выбор, обработку результатов экспертных оценок, обработку эмпирических данных в целях проведения группировки, классификации с выделением факторов [39]. Основным моментом в коллективных методах заключается в определении круга лиц, участников данной процедуры. Коллективные формы групповой работы могут быть разные: заседания, совещания, работа в комиссии.

3. ВОЗМОЖНЫЕ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕЩАНИЙ

Исходя из описанной выше картины, авторы считают необходимым:

- объективизировать процесс поиска компромиссов (согласования мнений) участников совещания, выраженных в тех или иных невербальных видах оценок, например, применять дискретный [40] или статистический [41, 42] подходы к согласованию экспертных ранжировок участников совещаний;
- учитывать основные принципы проведения любой экспертизы участников совещаний, описанные в работе [43];
- разработать и использовать процедуру подбора разновидности производственного совещания как инструмента повышения эффективности деятельности малых групп участников;
- разработать подход к корректному описанию четко выделенной совокупности таких экспертных методов (методик или процедур), как совещания, этот подход должен опираться на достаточно адекватную информационную вербальную нормативную модель совещания или, если это невозможно, рассмотреть синкретичную модель как не расчлняемую совокупность моделей; для этого необходимо рассмотреть множество всех, потенциально возможных, основных свойств и характеристик любой потен-

циально возможной разновидности совещания с тем, чтобы в дальнейшем описание любой разновидности совещания базировалось на описании элементов построенной модели;

- разработать и (или) применять существующие системы автоматизированной поддержки группового принятия управленческих решений, в том числе стратегических, для ускорения процессов достижения согласия малых групп людей относительно целей и путей действий в проблемной ситуации;
- более точно и конкретно использовать результаты, полученные в рамках описанных подходов;
- «систематизировать основные сведения о методике данной формы работы и выработку определенных рекомендаций по оптимизации и повышению эффективности подготовки и проведения служебных совещаний» [44];
- уделить внимание таким вопросам, как «повестка, время проведения, этика, виртуальное сотрудничество для ускорения достижения согласия, совершенствование культуры³».

Поскольку рассматриваемая проблематика близка к вопросам теории группового выбора, следует воспользоваться и ее потенциалом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условия применимости той или иной рассматриваемой разновидности совещаний в каждой конкретной ситуации определяются анализом баланса ее преимуществ и недостатков, возможностей и ограничений.

Авторы надеются, что исследователи обратят внимание на перспективные постановки задач и направления будущих исследований в области выбора наилучшей процедуры проведения совещаний и предложения по повышению их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панфилова А.П.* Деловая коммуникация в профессиональной деятельности: учеб. пособие. — СПб.: Знание, 2001. — 496 с.
2. *Друкер П.Ф.* Энциклопедия менеджмента. — М., 2004. — 432 с.
3. *Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В.* Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 1. Традиционные подходы к проблеме // Проблемы управления. — 2018. — № 6. — С. 18—23.

³ Авторы благодарны одному из рецензентов за соответствующие замечания.



4. *Gordon W.J.J.* Synectics: The development of creative capacity. — Harper & Row, 1961. — 180 p.
5. *Prince G.M.* The Practice of Creativity: A Manual for Dynamic Group Problem-Solving Paperback. — Echo Point Books & Media, 2012. — 272 p.
6. *Сидельников Ю.В., Минаев Э.С.* Технология экспертного сценарного прогнозирования. — М.: Изд-во МАИ, 2017. — 232 с.
7. *Gilde W. und Starke C.-D.* Ideen muss man haben. — Leipzig: Urania, 1969. — 158 s.
8. *Delbecq A.L., Van de Ven A.H.* A Group Process Model for Identification and Program Planning // Journal of Applied Behavioral Sciences. — 1971. — Vol. 7, iss. 4. — P. 466–492.
9. *Delbecq A.L., Van de Ven A.H., Gustafson D.H.* Group Techniques for Program Planning, a Guide to Nominal Group Technique and Delphi Processes. — Scott Foreman, 1975.
10. *Горбунова Е.М.* Метод номинальных групп. Социология: 4М. — 2003. — № 16. — С. 5–24.
11. *Хвастунов Р.М., Винокур И.Л., Сидельников Ю.В.* и др. Экспертные оценки в медико-гигиенических исследованиях: Методические рекомендации. — М.: НИИ МТ РАМН, 1992. — 45 с.
12. *Хвастунов Р.М.* Квалиметрия для менеджеров. Экспертные методы квалиметрии. Ч. III–V: учеб.-метод. пособие. — М.: МАЭП, 1998.
13. *Сидельников Ю.В.* Технология экспертного прогнозирования: учеб. пособие. — М.: Доброе слово, 2004. — 291 с.
14. *Quantitative Methods in Marketing* / Ed. by G.J. Hooley and M.K. Hussey. — London: International Thomson Business Press, 1999. — P. 92–119.
15. *Методика ролевой игры.* — URL: https://www.skady.narod.ru/ludj/1/Me_RI.html копия (дата обращения 03.05.2018).
16. *Тарнавский В.* Оптимальные методы прогнозирования продаж // Новый маркетинг. — 2004. — № 2. — URL: <http://masters.donntu.org/2007/kita/gurzhiy/library/text2.htm> (дата обращения 06.05.2018).
17. *Менте Морри ван.* Эффективное использование ролевых игр в тренинге. — СПб.: Питер, 2001. — 208 с. — URL: http://pedlib.ru/Books/5/0379/5_0379-16.shtml (дата обращения 11.05.2018).
18. *Особенности проведения совещаний разных видов.* — URL: https://studopedia.ru/2_111839_osobennosti-provedeniya-soveshchaniy-raznih-vidov.html (дата обращения 14.05.2018).
19. *Евланов Л.Г., Кутузов В.А.* Экспертные оценки в управлении. — М.: Экономика, 1978. — 133 с.
20. *Метод интеграции решений.* — URL: <http://sdamzavas.net/2-16762.html> (дата обращения 29.05.2018).
21. *Экспертные методы в маркетинге.* — URL: https://vuzlit.ru/307323/ekspertnye_metody_marketinge (дата обращения 01.06.2018).
22. *Кабушкин Н.Л.* Основы менеджмента: учеб. пособие: 5-е изд., стереотип. — Мн.: Новое знание, 2002. — 336 с. — URL: <http://finlit.online/page/menedzh/ist/ist-7-idz-ax253-nf-31.html> (дата обращения 06.06.2018).
23. *Ременников Б.В.* Управленческие решения. — URL: <http://dogmon.org/remennikov-v-b-upravlencheskie-resheniya.html?page=3> (дата обращения 07.06.2018).
24. *URL:* <http://historic.ru/books/item/f00/s00/z0000006/st028.shtml> (дата обращения: 19.11.2018).
25. *Балабанова Л.В., Сардак О.В.* Організація праці менеджера. Підручник: 2 вид. — Київ: ВД «Професіонал», 2007. — 416 с.
26. *URL:* http://artkmv.ru/page.php?p=manag_072 (дата обращения: 19.11.2018).
27. *URL:* <https://studopedia.org/5-62938.html> (дата обращения: 19.11.2018).
28. *Процесс принятия решения по системе «ринги» — особенности японской модели принятия решений.* — URL: https://studwood.ru/1087795/menedzhment/protsess_prinyatiya_resheniya_sisteme_ringi (дата обращения 07.06.2018).
29. *Особенности проведения совещаний разных видов.* — URL: <https://studfiles.net/preview/1851762/page:18/> (дата обращения 13.05.2018).
30. *Метод шести шляп мышления Эдварда де Боно — конструктор успеха.* — URL: <https://constructor.ru/usrex/metod-shesti-shlyap-myshleniya-edvarda-de-bono.html> (дата обращения 11.06.2018).
31. *Кричевский Р.Л., Дубовская Е.М.* Социальная психология малой группы: учеб. пособие для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2001. — 318 с.
32. *Андреева Г.М.* Социальная психология: 3-е изд. — М.: Наука, 1994. — 325 с.
33. *Cartwright D., Zander A.* (Eds.) Group dynamics. Research and Theory. — N.-Y., 1968. — 580 p.
34. *Вартамян А.А.* Управление командой и организацией в бизнес-среде. — М.: Доброе слово, 2006. — 288 с.
35. *Вартамян А.А.* Управление командой с вершины пирамиды Маслоу. — М.: Доброе слово, 2006. — 216 с.
36. *Вартамян А.А., Сидельников Ю.В.* Бизнес-команда и ее потребности. — Материалы XXXII междунар. конф. «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT + S&E'05». Ялта, май 2005 г. — С. 390–391.
37. *Вартамян А.А., Сидельников Ю.В.* Вторая грань пирамиды Маслоу // Экономические стратегии. — 2006. — № 1. — С. 116–120.
38. *Лопатников Л.И.* Экономико-математический словарь: словарь современной экономической науки. — М.: Дело, 2003. — 520 с.
39. *URL:* <https://studopedia.info/6-70380.html> (дата обращения 31.10.2018).
40. *Крылов Е.М.* Структурно-аналитические модели, алгоритмы и программное обеспечение классификационной обработки данных в пространстве ранговых оценок для автоматизации принятия решений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Харьков: ХИР, 1984.
41. *ГОСТ 23554.1–79.* Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции. — М.: Изд-во стандартов, 1980.
42. *ГОСТ 23554.2–81.* Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Обработка значений экспертных оценок качества продукции. — М.: Изд-во стандартов, 1982.
43. *Сидельников Ю.В.* Системный анализ технологии экспертного прогнозирования. — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 348 с.
44. *Тарасов М.В.* Методика подготовки и проведения служебных совещаний // Журнал РОД «За права военнослужащих». — 2005. — № 9. — URL: <http://voenprav.ru/doc-3266-1.htm> (дата обращения 21.06.2018).

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Е. Ленским.

Сидельников Юрий Валентинович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН г. Москва; профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ✉ sidelnikovy@mail.ru,

Ряпухин Анатолий Вячеславович — зам. начальника отдела, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ✉ Ryapukhin_av@mail.ru.

Поступила в редакцию 10.07.2018, после доработки 23.09.2018. Принята к публикации 04.10.2018.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ В АБСТРАКТНЫХ СИСТЕМАХ¹

Ф.Т. Алескеров, Д.Н. Тверской

Предложена модель специализации в абстрактных системах с учетом общего ресурсного ограничения при условии, что структурные ограничения в модели являются линейными функциями. Изучены свойства решения задачи максимизации эффективности функционирования системы. Изучен вопрос возникновения специализации в системе с идентичными элементами.

Ключевые слова: абстрактные системы, специализация, общее ресурсное ограничение, структурные ограничения, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с классических работ [1, 2], оптимизационные методы широко применяются при моделировании биологических процессов. В частности, в рамках эволюционной биологии исследуется вопрос перехода от одноклеточных организмов к многоклеточным формам жизни. Изучается, каким образом колониальные организмы трансформируются в процессе эволюции в многоклеточные формы жизни, какие факторы влияют на данный процесс. Колониальный организм устроен следующим образом: некоторые клетки могут специализироваться на какой-то конкретной функции, но при этом не теряют потенциальной возможности выполнять прочие функции и выполняют их, например, в случае изменений внешних условий, вынуждающих к этому. Если условия, которые

способствуют возникновению полной специализации в колониальном организме, сохраняются в течение достаточно длительного периода времени, то возможен переход от колониальной формы к многоклеточному организму.

Однако основополагающим оптимизационным моделям специализации, предлагаемым в эволюционной биологии [3–5], присущ ряд фундаментальных недостатков. Например, они не учитывают влияние окружающей среды на систему, хотя ряд экспериментальных работ показывает, что факторы окружающей среды должны оказывать влияние на жизнедеятельность колонии [6, 7]. В данной работе мы усовершенствуем модели, предлагаемые в эволюционной биологии, устраняя указанные недостатки, и рассматриваем эти новые модели уже в контексте теории абстрактных систем. Отметим, что рассматриваемые в данной работе задачи относятся к классу задач, исследуемых в рамках системной оптимизации [8].

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-01-00804а, и в рамках программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» с использованием средств субсидии в рамках государственной поддержки ведущих университетов РФ «5-100», а также при финансовой поддержке Лаборатории теории выбора и анализа решений (ИПУ РАН) и Международной лаборатории анализа и выбора решений (НИУ ВШЭ).

1. МОДЕЛЬ

Рассмотрим абстрактную систему, состоящую из N элементов. Пусть $i = 1, \dots, N$ — индексы элементов в системе. Предположим, что каждый элемент может выполнять одну из двух задач.

Обозначим через $b_i \in [0, b_i^{\max}]$ уровень выполнения первой задачи элементом с индексом i , через $v_i \in [0, v_i^{\max}]$ — уровень выполнения второй задачи элементом с индексом i . Для каждого элемента с индексом i величины b_i^{\max} и v_i^{\max} есть неотрицательные вещественные числа, которые можно интерпретировать как максимально возможные уровни выполнения элементом с индексом i первой и второй задач соответственно. Кроме того, введем обозначения $b = (b_1, \dots, b_N)$ и $v = (v_1, \dots, v_N)$.

Теперь определим уровни выполнения задач всей системой в целом. Будем полагать, что уровень выполнения системой первой задачи (B) есть аддитивная функция переменных b_i , а уровень выполнения системой второй задачи (V) есть аддитивная функция переменных v_i :

$$B(b) = \sum_{i=1}^N b_i; \quad V(v) = \sum_{i=1}^N v_i$$

Определим индекс эффективности системы (W) как произведение уровней выполнения системой первой и второй задач:

$$W = VB. \quad (1)$$

Мы пользуемся данным индексом, следуя работе [3] и исходя из того, что данный индекс отражает синергетический эффект, возникающий между элементами, находящимися в одной системе. В самом деле, представим, что один элемент в системе имеет высокий уровень выполнения первой задачи и очень низкий — второй; другой элемент, наоборот, высокий уровень выполнения второй задачи и очень низкий — первой. Каждый элемент по отдельности, вне системы, будет иметь низкую эффективность, в то время как вместе, внутри системы, они смогут достигнуть достаточно большой эффективности.

Будем предполагать, что внутренняя структура каждого элемента такова, что элемент не может увеличивать уровень выполнения одной из двух задач, не уменьшив уровень выполнения другой. Данная предпосылка формализуется понятием структурного ограничения элемента:

$$v_i = v_i^{\max} - \alpha_i b_i,$$

где $\alpha_i > 0$, $v_i^{\max} > 0$, для всех $i = \overline{1, N}$.

Определение. Будем говорить, что два элемента системы одинакового типа, если соответствующие параметры их структурных ограничений совпадают [9—11]. ♦

Для каждого элемента с индексом $i \in \{1, \dots, N\}$ введем величину $b_i^{\max} = v_i^{\max} / \alpha_i$. Линейность структурных ограничений позволяет упростить дальнейшие рассуждения.

Мы будем предполагать также, что внешняя среда оказывает влияние на эффективность функционирования системы. Для этого введем общее, условно говоря, ресурсное ограничение. Пусть C — это уровень ресурса, доступный системе при заданных параметрах внешней среды. Предположим, что для выполнения единицы первой задачи системе требуется k_1 единиц ресурса, а для выполнения единицы второй задачи — k_2 единиц ресурса. Кроме того, если некоторый элемент системы выполняет одновременно обе задачи, это влечет за собой наличие дополнительных затрат ресурсов (связанных, например, с необходимостью пространственного разделения процессов выполнения различных задач внутри элемента). Таким образом, общее ресурсное ограничение имеет вид:

$$k_1 \sum_{i=1}^N b_i + k_2 \sum_{i=1}^N v_i + k_3 \sum_{i=1}^N b_i v_i \leq C, \quad (2)$$

где $k_1, k_2, k_3, C > 0$.

Рассмотрим выражение $\sum_{i=1}^N b_i v_i$. В нем слагаемое с индексом i может быть рассмотрено как индекс эффективности системы, состоящей из одного единственного элемента с индексом i , вычисленный согласно формуле (1). Иначе говоря, величина $\sum_{i=1}^N b_i v_i$ представляет собой суммарную эффективность заданного набора элементов вне рассматриваемой системы. Поэтому будем называть слагаемое $k_3 \sum_{i=1}^N b_i v_i$ в формуле (2) издержками оппортунистического поведения элементов системы. Можно предположить, что ненулевые значения параметра k_3 могут возникнуть в процессе эволюции системы с целью поддержания стабильности этой системы.

Оптимальной стратегией системы будем называть набор (b^*, v^*) таких уровней выполнения задач каждым из элементов, которые при условии существования структурных ограничений и общего ресурсного ограничения позволяют максимизировать эффективность функционирования системы. Таким образом, мы можем свести нашу задачу к

классической задаче математического программирования с ограничениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \sum_{i=1}^N b_i \cdot \sum_{i=1}^N v_i \rightarrow \max_{b, v}, \\ \forall i = 1, \dots, N: v_i = v_i^{\max} - \alpha_i b_i, \\ k_1 \sum_{i=1}^N b_i + k_2 \sum_{i=1}^N v_i + k_3 \sum_{i=1}^N b_i v_i \leq C, \\ \forall i = 1, \dots, N: v_i \geq 0, \\ \forall i = 1, \dots, N: b_i \geq 0. \end{array} \right.$$

Отметим, что данная оптимизационная задача может быть несколько упрощена (уменьшением числа переменных вдвое) и сведена к следующей задаче максимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \sum_{i=1}^N b_i \left(\sum_{i=1}^N v_i^{\max} - \sum_{i=1}^N \alpha_i b_i \right) \rightarrow \max_b, \\ k_1 \sum_{i=1}^N b_i + \sum_{i=1}^N (k_2 + k_3 b_i)(v_i^{\max} - \alpha_i b_i) \leq C, \\ \forall i = \overline{1, N}: 0 \leq b_i \leq b_i^{\max}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Будем говорить, что элемент с индексом i специализируется на первой задаче, если $b_i^* = b_i^{\max}$ (равносильно $v_i^* = 0$). Аналогично, будем считать, что элемент с индексом i специализируется на второй задаче, если $v_i^* = v_i^{\max}$ (равносильно $b_i^* = 0$). Если некоторый элемент не специализируется ни на первой, ни на второй задаче, то такой элемент мы будем называть неспециализированным. Будем говорить, что в системе возникла специализация, если хотя бы один элемент этой системы специализируется на одной из задач. Главным образом, нас будет интересовать вопрос возникновения специализации в рассматриваемой системе.

2. ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем некоторые общие утверждения, касающиеся свойств индекса эффективности системы, структуры ресурсного ограничения и свойств решения задачи (3).

Утверждение 1. Введем обозначение: $H = \{b \in R^N | \forall i = \overline{1, N}: 0 \leq b_i \leq b_i^{\max}\}$. Рассмотрим множество $A(\overline{W}) = \{b \in H | W(b) \geq \overline{W}\}$. При любом значении \overline{W} множество $A(\overline{W})$ является выпуклым. ♦

Фактически, данное утверждение выявляет простую структуру линий уровня рассматриваемого индекса эффективности. Теперь приведем утверждение, описывающее структуру ресурсного ограничения задачи (3).

Доказательство утверждений см. в Приложении.

Утверждение 2. Рассмотрим ресурсное ограничение задачи (3).

(а) Ресурсное ограничение задает замкнутое множество в евклидовом пространстве, границей которого является $(N - 1)$ -мерный эллипсоид:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i (b_i - \gamma_i) \geq \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_i^2 + \frac{k_2 \sum_{i=1}^N v_i^{\max} - C}{k_3},$$

где $\gamma_i = \frac{k_1 - k_2 \alpha_i + k_3 v_i^{\max}}{2k_3 \alpha_i}$, $i = \overline{1, N}$.

(б) Обозначим через D множество допустимых решений задачи (3). Существует такое значение $C_1 > 0$, что при любом значении параметра C из множества $(0, C_1)$, множество D является пустым, а для всех $C \geq C_1$ множество D не пусто. Данное значение C_1 может быть найдено следующим образом:

$$C_1 = k_1 \sum_{i \in S} b_i^{\max} + k_2 \sum_{i \in \{1, \dots, N\} \setminus S} v_i^{\max},$$

где $S = \{i \in \{1, \dots, N\} | \alpha_i \geq k_1/k_2\}$. ♦

Далее приведем результаты, описывающие то, как устроено решение задачи (3). В частности, данные результаты являются прямыми следствиями рассмотренных ранее утверждений. Прежде всего, определим множество:

$$G = \{b \in H | k_1 B(b) + k_2 V(b) + k_3 \langle b, v(b) \rangle = C\}.$$

Утверждение 3. Пусть B^* — множество оптимальных решений задачи (3), а B^{**} — множество оптимальных решений задачи (3) без ресурсного ограничения. Тогда существуют такие значения параметра C , C_1 и C_2 , $0 < C_1 \leq C_2$, что:

- (а) $\forall C \geq C_2: B^* \subseteq B^{**}$,
- (б) $\forall C \in [C_1, C_2): B^* \subseteq G$,
- (в) $\forall C \in [0, C_1): B^* = \emptyset$,

где $C_1 = k_1 \sum_{i \in S} b_i^{\max} + k_2 \sum_{i \in \{1, \dots, N\} \setminus S} v_i^{\max}$,

$$C_2 = \min_{b \in B^{**}} \{k_1 B(b) + k_2 V(b) + k_3 \langle b, v(b) \rangle\}. \quad \blacklozenge$$

Таким образом, мы можем сделать следующие выводы относительно того, как устроено решение задачи (3). Прежде всего, существует пороговое



значение уровня доступного системе ресурса, такое, что если содержание ресурса во внешней среде опустится ниже данного порогового значения, система перестанет функционировать вообще. Далее, существует второе пороговое значение для уровня доступного ресурса. Если содержание ресурса во внешней среде выше данного значения, то ресурсное ограничение никак не влияет на эффективность системы — реализуется оптимальная стратегия при наличии только структурных ограничений. При любом уровне ресурса, находящемся в промежутке между двумя пороговыми значениями, ресурсное ограничение оказывает влияние на эффективность системы. При этом системой используется все доступное количество ресурса, что выглядит весьма реалистично в рамках практических интерпретаций рассматриваемых моделей.

Далее рассмотрим подробно один важный частный случай предлагаемой модели. Для этого случая проведем полный анализ решения и выявим, в каких случаях и при каких условиях возможно возникновение специализации.

3. СЛУЧАЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ ОДНОГО ТИПА

Наибольший интерес представляет случай модели, когда все элементы в системе одинакового типа (см. определение в § 1). В таком случае ни у одного элемента системы нет никакой заранее заданной структурной предрасположенности к выполнению одной из задач относительно других элементов системы. Итак, предположим, что все элементы системы одинакового типа. Нас будет интересовать вопрос возникновения специализации в рассматриваемой системе.

Утверждение 4. *Справедливы положения.*

$$(a) C_2 = \frac{N}{2}(k_1 b^{\max} + k_2 v^{\max}) + k_3 \left(N - 2 \left[\frac{N}{2} \right] \right) \times \frac{b^{\max} v^{\max}}{4}, \text{ где } \left[\frac{N}{2} \right] - \text{целая часть числа.}$$

(б) Для всех значений параметра C из отрезка $[C_1, C_2]$ в оптимуме будет не более одного неспециализированного элемента.

$$(в) \text{ Существует значение } C_3 = \frac{N}{2}(k_1 b^{\max} + k_2 v^{\max}) + k_3 N \frac{b^{\max} v^{\max}}{4} \text{ такое, что для всех } C \in [C_2, C_3]: B^* \subset B^{**}, \text{ а для всех } C \geq C_3: B^* = B^{**}, \text{ где } B^{**} = \left\{ b \in H \mid B(b) = \frac{N b^{\max}}{2} \right\}. \blacklozenge$$

Таким образом, можно сделать следующие выводы из утверждения 4. Прежде всего, если ресур-

сное ограничение влияет на оптимальную эффективность системы и позволяет системе существовать, то все элементы системы кроме, возможно, одного, будут специализированными. Далее, при всех $C \geq C_3$ множество решений задачи (3) совпадает с множеством решений задачи (3) без ресурсного ограничения — связным множеством стратегий, где стратегии, в которых хотя бы один элемент специализированный, образуют подмножество меры ноль. При уменьшении значения C от C_3 к C_2 множество оптимальных решений сужается до тех пор, пока мы не придем к ситуации, когда в оптимуме будет не более одного неспециализированного элемента. Мы видим, что по мере уменьшения количества доступного ресурса система будет вести себя таким образом: сначала система будет оставаться неспециализированной, затем каждый элемент также будет оставаться неспециализированным, но уровни выполнения некоторых функций данным элементом будут доминировать над уровнями выполнения других, пока, наконец, каждый элемент не станет специализированным. В конечном итоге, система вымрет от недостатка ресурса. Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим

Пример. Пусть система состоит из пяти элементов, каждый из которых характеризуется структурным ограничением $v_i = 2 - b_i$ для всех $i = \overline{1, 5}$. Пусть $k_1 = k_2 = 1$, $k_3 = 2$. Согласно утверждению 4 получаем, что $C_1 = 10$, $C_2 = 12$, $C_3 = 20$. При любом уровне доступного ресурса меньше 10 системе недостаточно ресурсов для функционирования, и она вымирает. При любом уровне доступного ресурса $C \in [10, 12)$ в оптимуме в системе будет два элемента, специализирующихся на первой функции, два элемента, специализирующихся на второй функции, и один неспециализированный элемент, уровни выполнения первой и второй функции которого равны соответственно $(1 + \sqrt{6-c}/2; 1 - \sqrt{6-c}/2)$ либо $(1 - \sqrt{6-c}/2; 1 + \sqrt{6-c}/2)$. В данном случае эффективность системы $W = 19 + c/2$. При $C \geq 12$ оптимальными уровнями выполнения первой функции будут все такие допустимые наборы b , что $B(b) = V(b) = 5$. Таким образом, индекс эффективности функционирования системы будет принимать значение 25. При $C \geq 30$ решением задачи будет уже все множество $B^{**} = \{b \in R^5 \mid \forall i = \overline{1, 5}, 0 \leq b_i \leq 2, B(b) = 5\}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены и исследованы общие математические модели, описывающие проблемы разделения труда между элементами некоторой абстрактной системы. Введено понятие специализации в рассматриваемых абстрактных системах, сформу-

лирована задача максимизации эффективности функционирования системы и изучены возможности возникновения специализации в оптимуме в зависимости от наличия в модели элементов различных типов и в зависимости от влияния факторов окружающей среды (при предположении о линейности всех рассматриваемых ограничений). Приведены общие результаты, описывающие структуру решения рассматриваемой задачи математического программирования. Детально рассмотрен случай, когда все элементы системы идентичны друг другу. Описано, как и при каких условиях возможно возникновение специализации и как различные параметры модели влияют на переход системы к специализированным состояниям.

Отметим, что рассмотренные в работе абстрактные модели специализации могут быть применены для описания широкого круга проблем, возникающих не только в эволюционной биологии, но и в экономике, истории, социальных науках. Для примера рассмотрим систему научно-учебных учреждений некоторого региона. Элементы этой системы — научно-учебные заведения. Каждое из этих заведений может выполнять одну или несколько функций (например, образовательную или научно-исследовательскую). Каждое научно-учебное заведение может обладать своей уникальной внутренней структурой. Внешняя среда оказывает влияние на систему научно-учебных учреждений наличием различного рода бюджетных ограничений. Задача состоит в том, чтобы определить, каким образом распределить выполнение задач между элементами так, чтобы максимизировать эффективность данной системы. Элементы, специализирующиеся на научной деятельности, можно интерпретировать как научные институты; элементы, специализирующиеся на образовательной деятельности — как высшие учебные заведения, занимающиеся только образовательной деятельностью; неспециализированные элементы — как научно-исследовательские университеты.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения 1

Пусть $b^1, b^2 \in A(\bar{W})$. Покажем, что $\lambda b^1 + (1 - \lambda)b^2 \in A(\bar{W})$, где $\lambda \in [0; 1]$. В самом деле, $W(\lambda b^1 + (1 - \lambda)b^2) = V(\lambda b^1 + (1 - \lambda)b^2)V(\lambda b^1 + (1 - \lambda)b^2) = (\lambda V(b^1) + (1 - \lambda)V(b^2))(\lambda V(b^1) + (1 - \lambda)V(b^2)) = \lambda^2 W(b^1) + (1 - \lambda)^2 \times W(b^2) + \lambda(1 - \lambda)(V(b^1)V(b^2) + V(b^2)V(b^1))$ [по неравенству между средним арифметическим и средним геометрическим] $\geq \lambda^2 W(b^1) + (1 - \lambda)^2 W(b^2) + 2\lambda(1 - \lambda) \times$

$$\times \sqrt{V(b^1)V(b^2)} \geq [\text{поскольку } b^1, b^2 \in A(\bar{W})] \geq \lambda^2 \bar{W} + (1 - \lambda)^2 \bar{W} + 2\lambda(1 - \lambda)\bar{W} = \bar{W}.$$

Следовательно, $\lambda b^1 + (1 - \lambda)b^2 \in A(\bar{W})$, что и требовалось доказать.

Доказательство утверждения 2

(а) Непосредственной постановкой структурных ограничений в ресурсное ограничение получаем требуемый результат.

(б) Множество D пусто тогда и только тогда, когда параллелепипед H лежит во внутренности эллипсоида, задаваемого ресурсным ограничением. Параллелепипед H лежит во внутренности эллипсоида тогда и только тогда, когда его каждая крайняя точка (вершина H) лежит во внутренности эллипсоида. Это означает, что

$$\max_{b \in \text{Vert}(H)} \sum_{i=1}^N \alpha_i (b_i - \gamma_i)^2 < \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_i^2 + \frac{k_2 \sum_{i=1}^N v_i^{\max} - C}{k_3},$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \max_{b \in \{0, b_i^{\max}\}} (b_i - \gamma_i)^2 < \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_i^2 + \frac{k_2 \sum_{i=1}^N v_i^{\max} - C}{k_3},$$

$$\sum_{i \in S} \alpha_i (b_i^{\max} - \gamma_i)^2 + \sum_{i \in \{1, \dots, N\} \setminus S} \alpha_i \gamma_i^2 < \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_i^2 + \frac{k_2 \sum_{i=1}^N v_i^{\max} - C}{k_3}.$$

Разрешая неравенство относительно C , получаем:

$$C < k_1 \sum_{i \in S} b_i^{\max} + k_2 \sum_{i \in \{1, \dots, N\} \setminus S} v_i^{\max},$$

что и требовалось доказать.

Доказательство утверждения 3

(а) Множество B^{**} есть компакт. Рассмотрим

$$C_2 = \max_{b \in B^{**}} \{k_1 B(b) + k_2 V(b) + k_3 \langle b, v(b) \rangle\}.$$

Для всех $C < C_2$ искомая точка из множества B^{**} не будет лежать в множестве D . Напротив, для всех $C \geq C_2$ хотя бы одна точка из множества B^{**} будет принадлежать множеству D . Рассмотрим множество $D \cap B^{**}$ для $C \geq C_2$. Точки из данного множества есть решения задачи (3) без ресурсного ограничения. При добавлении ресурсного ограничения множество допустимых решений либо сужается, либо остается неизменным, следовательно, множество $D \cap B^{**}$ — решение задачи (3) для $C \geq C_2$.

(б) Покажем, что любая точка локального максимума функции $W(b)$ на множестве H является точкой глобального максимума функции $W(b)$ на множестве H .

Пусть b^1 — точка локального максимума функции $W(b)$ на множестве H . Следовательно, существует окрестность $U(b^1)$ такая, что для всех $b \in U(b^1) \cap H$: $W(b) \leq W(b^1)$.



Пусть b^2 — точка глобального максимума функции $W(b)$ на множестве H . Пусть $W(b^2) > W(b^1)$. Тогда, согласно утверждению 1, значение функции $W(b)$ на отрезке $[b^1, b^2]$ должно быть больше или равно $W(b^1)$. Получаем, что на множестве $[b^1, b^2] \cap U(b^1)$ функция $W(b)$ постоянна и равна $W(b^1)$. Из утверждения 1 будет следовать, что на $[b^1, b^2] \cap U(b_1)$ функции $B(b)$ и $V(b)$ будут также постоянными. Эти функции линейные, следовательно, они будут постоянными по всей прямой, содержащей $[b^1, b^2] \cap U(b^1)$. Таким образом, получаем, что $W(b^1) = W(b^2)$ — противоречие.

Пусть точки глобального максимума функции $W(b)$ на множестве H не являются допустимыми и $D = \emptyset$, т. е. $C_1 \leq C < C_2$. Пусть решение задачи (3) $b^* \notin G$. Тогда b^* — точка локального максимума функции $W(b)$ на множестве H , следовательно, точка глобального максимума функции $W(b)$ на множестве H . Имеем противоречие.

(в) Следует из утверждения 2, п. (б).

Доказательство утверждения 4

$$(a) \text{ Согласно работе [3] множество } B^{**} = \left\{ b \in H \mid B(b) = \frac{Nb^{\max}}{2} \right\}.$$

По определению

$$\begin{aligned} C_2 &= \max_{b \in B^{**}} \{k_1 B(b) + k_2 V(b) + k_3 \langle b, v(b) \rangle\} = \\ &= \frac{N}{2} (k_1 b^{\max} + k_2 v^{\max}) + k_3 \left(\frac{Nb^{\max} v^{\max}}{2} - \alpha_i \max_{b \in B^{**}} \sum_{i=1}^M b_i^2 \right) = \\ &= \frac{N}{2} (k_1 b^{\max} + k_2 v^{\max}) + k_3 \left(\frac{Nb^{\max} v^{\max}}{2} - \left[\frac{N}{2} \right] b^{\max} v^{\max} - \right. \\ &\quad \left. - N - 2 \left(\frac{N}{2} \right) \frac{b^{\max} v^{\max}}{4} \right) = \frac{N}{2} (k_1 b^{\max} v^{\max} + k_2 b^{\max} v^{\max}) + \\ &\quad + k_3 \left(N - 2 \left[\frac{N}{2} \right] \frac{b^{\max} v^{\max}}{4} \right). \end{aligned}$$

(б) Пусть b^* — решение задачи (3).

По утверждению 3, $b^* \in G$. Предположим, что в оптимуме есть более одного неспециализированного элемента, т. е., $\exists i, j \in \{1, \dots, N\}: 0 < b_i^* < b^{\max}, 0 < b_j^* < b^{\max}$ и $b_i^* \leq b_j^*$. Рассмотрим $\varepsilon: 0 < \varepsilon < \min\{b_i^*, b^{\max} - b_j^*\}$. Рассмотрим точку b , которая отличается от точки b^* двумя координатами: $b_i = b_i^* - \varepsilon, b_j = b_j^* + \varepsilon$. Тогда $B(b) + V(b^*) = B(b^*) + V(b)$, $W(b) = W(b^*)$, $b \in H$.

Рассмотрим выражение:

$$\begin{aligned} &k_1 B(b) + k_2 V(b) + k_3 \langle b, v(b) \rangle = \\ &= C + k_3 ((b_i^* - \varepsilon)(v_i^* + \alpha\varepsilon) + (b_j^* + \varepsilon)(v_j^* - \alpha\varepsilon) - \\ &- b_i^* v_i^* - b_j^* v_j^*) = C + k_3 \varepsilon (\alpha b_i^* - \alpha b_j^* + v_j^* - v_i^* - 2\alpha\varepsilon) = \\ &= C + 2\alpha k_3 \varepsilon ((b_i - b_j) - \varepsilon) < C, \end{aligned}$$

т. е. $b \in D$ и является решением задачи (3). Однако $b \notin G$, что противоречит п. (б) утверждения 3, что и требовалось доказать.

(в) По определению

$$\begin{aligned} C_3 &= \max_{b \in B^{**}} \{k_1 B(b) + k_2 V(b) + k_3 \langle b, v(b) \rangle\} = \\ &= \frac{N}{2} (k_1 b^{\max} + k_2 v^{\max}) + k_3 \left(\frac{Nb^{\max} v^{\max}}{2} - \frac{Nb^{\max} v^{\max}}{4} \right) = \\ &= \frac{N}{2} (k_1 b^{\max} + k_2 v^{\max}) + k_3 N \frac{b^{\max} v^{\max}}{4}. \end{aligned}$$

Авторы благодарны двум анонимным рецензентам за ценные замечания и комментарии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith J.M. Optimization theory in evolution // Ann. Rev. Ecol. Syst. — 1978. — Vol. 9. — P. 31–56.
2. Parker G.A., Smith J.M. Optimality theory in evolutionary biology // Nature. — 1990. — Vol. 348. — P. 27–33.
3. Michod R.E., Viossat Y., Solari C.A., et al. Life-history evolution and the origin of multicellularity // J. Theor. Biol. — 2006. — Vol. 239. — P. 257–272.
4. Ispolatov I., Ackermann M., Doebeli M. Division of labour and the evolution of multicellularity // Proc. R. Soc. London B. — 2012. — Vol. 279. — P. 1768–1776.
5. Solari C.A., Kessler J.O., Goldstein R.E. Motility, mixing, and multicellularity // Gen. Program. Evol. Mach. — 2007. — Vol. 8. — P. 115–129.
6. Rossetti V., Schirmermeister B.E., Bernasconi M.V., Bagheri H.C. The evolutionary path to terminal differentiation and division of labor in cyanobacteria // J. Theor. Biol. — 2010. — Vol. 262. — P. 23–34.
7. Rossetti V., Bagheri H.C. Advantages of the division of labour for the long-term population dynamics of cyanobacteria at different latitudes // Proc. R. Soc. London B. — 2012. — Vol. 279. — P. 3457–3466.
8. Новиков Д.А. Комплексные модели системной оптимизации производственно-экономической деятельности предприятия // Управление большими системами. — 2017. — Вып. 65. — С. 118–152.
9. Ispolatov I., Madhok V., Doebeli M. Individual-based models for adaptive diversification in high-dimensional phenotype spaces // J. Theor. Biol. — 2016. — Vol. 390. — P. 97–105.
10. Gavrillets S. Rapid Transition towards the Division of Labor via Evolution of Developmental Plasticity // PLOS Comput. Biol. — 2010. — Vol. 6, N 6.
11. Rueffler C., Hermisson J., Wagner G.P. Evolution of functional specialization and division of labor // PNAS. — 2012. — Vol. 109. — P. 326–335.

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

Алескеров Фуад Тагиевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; ординарный профессор, зав. лабораторией, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, ✉ alesk@hse.ru,

Тверской Денис Никитович — ст. математик, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; аспирант, стажер-исследователь, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, ✉ disa1591@mail.ru.

Поступила в редакцию 16.07.2018, после доработки 06.10.2018.

Принята к публикации 17.10.2018.

СИНТЕЗ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ¹

Ю.А. Полунин

Предложен синтез методов регрессионного анализа и нелинейной динамики для описания и исследования дискретных данных, порождаемых нелинейными социально-экономическими процессами. Отмечено, что такой подход оказывается эффективным для анализа дискретных эмпирических данных нелинейных процессов, развивающихся в условиях ограничений, когда приращения процессов пропорциональны достигнутому уровню с поправкой на влияние ограничений. Применение предлагаемого подхода проиллюстрировано на примере анализа динамики выручки российских компаний крупного и среднего бизнеса за период с 2009 по 2015 г. Получены обобщающие результаты, позволяющие выявить различный характер динамики темпов прироста выручки различных групп компаний, оценить их текущее положение и дальнейшую динамику. Предложены модели для различных закономерностей развития процессов, проявляющихся в различных влияниях ограничений.

Ключевые слова: нелинейные процессы, дискретные эмпирические данные, отображения как модели нелинейной динамики, темпы прироста, модели регрессионного анализа, взаимосвязь параметров отображений и коэффициентов регрессий, особые точки и их устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Для обработки эмпирических данных социально-экономических процессов широко применяются методы регрессионного анализа. Наряду со многими достоинствами их применение в анализе порождает и проблему: о динамике социально-экономических процессов, как правило, имеется нечеткое теоретическое представление, отсутствует априорная информация о классе истинной функции регрессии, поэтому в качестве моделей регрессионного анализа используются достаточно универсальные функции, например, полиномы. Полученные на основании таких моделей результаты трудно интерпретировать для более глубокого понимания закономерностей реального процесса. Дальнейшую интерпретацию можно провести, если в качестве базовой принять модель, связанную с моделью регрессионного анализа и отражающую хотя бы какую-нибудь специфику анализируемых социально-экономических процессов.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-01-07944-а «Разработка алгоритмов и математических моделей для анализа и прогноза процессов развития и самоорганизации в социально-экономических системах».

Тогда можно перейти от результатов регрессионного анализа к параметрам другой модели и провести углубленный анализ на ее основе.

Найти универсальную базовую модель, отражающую специфику всех социально-экономических процессов, невозможно в силу их многообразия. Однако можно выделить класс социально-экономических процессов, имеющих достаточно общие закономерности и учесть эти закономерности при выборе базовых моделей анализа. Для такого подхода в настоящей статье предлагаются базовые модели, которыми после соответствующих преобразований можно воспользоваться и в качестве моделей регрессионного анализа.

В качестве мостика между регрессионным анализом и интерпретацией его результатов можно принять базовые модели, отражающие специфику некоторого класса социально-экономических процессов. Предлагаемые в статье методы эффективны для процессов, имеющих следующие особенности.

- Из теоретических рассуждений невозможно определить истинные функции, генерирующие значения процессов, поэтому нужно рассматривать несколько альтернативных моделей, а для выбора оптимальной применять статистические критерии.



- Измерения процессов дискретны — это специфика большинства процессов как социальных, так и экономических.
- Процессы развиваются в условиях ограничений. Как правило, такие ограничения носят ресурсный характер. В силу влияния ограничений процессы имеют нелинейный характер. Существование ограничений в экономике и менеджменте столь обычно, что управлению в условиях ограничений посвящена специальная теория ограничений [1].
- Приращения процессов зависят от текущего состояния с поправкой на влияние ограничений.
- Процессы, как правило, протекают в быстротекущей среде. Это приводит к тому, что однородные участки занимают короткие временные интервалы.
- Возможны ситуации, когда анализируемые процессы развиваются в среде, где взаимодействуют несколько процессов, и такие ситуации необходимо учитывать.

Таковыми особенностями обладают многие социально-экономические процессы, например: динамика показателей деятельности компаний, таких как выручка; протекание избирательной кампании, описываемое измерениями числа сторонников кандидатов; формирование общественного мнения, описываемое числом людей, поддерживающих некую идею; дискуссии в Интернете, описываемые числом вступивших в дискуссию; логическая динамика стоимости акций и т. п.

Для анализа таких процессов предлагается в качестве базовых моделей применить нелинейные отображения, связывающие значения процессов во времени. Эти отображения должны позволять преобразовывать их в модели регрессионного анализа. Будем употреблять термин «отображения», как это принято в нелинейной динамике. Фактически это уравнения, описывающие изменение значений процесса в виде $X_{n+1} = G\{X\}$, где X_{n+1} — следующее значение процесса (на временном шаге $n + 1$), $G\{X\}$ — нелинейная функция от текущего и предыдущих значений процесса. Функция $G\{X\}$ отражает особенности социально-экономических процессов, сформулированные выше. Если рассматривается взаимодействие нескольких процессов, то аргументами нелинейной функции служат значения взаимодействующих процессов. В рамках данной статьи отображения будем рассматривать как итерируемые или дискретные отображения [2].

Применение нелинейных отображений в качестве базовых позволяет перейти от коэффициентов регрессионных моделей к оценкам параметров отображений. Это, в свою очередь, позволяет получить описание процесса в категориях нелинейной динамики:

— значения ограничений процессов и значения особых (неподвижных) точек с оценкой их устойчивости — такие характеристики позволяют в ходе анализа рассуждать о пределах развития процессов и характере динамики при сильном влиянии ограничений.

— значения нормированных интенсивностей — позволяют описывать и сопоставлять характер динамики различных процессов как количественно, так и качественно.

Кроме того, появляется возможность моделирования дальнейшего развития процессов на основании коэффициентов регрессионных моделей.

В дальнейшем полученные результаты могут быть интерпретированы в категориях конкретного социально-экономического процесса. Так, например, в рассматриваемом далее анализе динамики выручки российских компаний удалось выявить особенности изменения выручки для разных групп компаний, что позволило:

— описать картину жизненного цикла российских компаний в категориях темпов прироста выручки;

— для различных групп компаний оценить размеры рыночных ниш по выручке и их стабильность;

— проследить особенности влияния предыстории на размеры рыночных ниш для различных групп компаний;

— выявить группы однотипных компаний по характеру динамики выручки.

1. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЫРУЧКИ РОССИЙСКИХ КОМПАНИЙ

Рассмотрим применение предлагаемого метода на примере анализа выручки российских компаний. Задачи анализа динамики всей совокупности российских компаний появились относительно недавно с появлением обязательной отчетности компаний и созданием баз данных по ней. Динамику выручки российских компаний можно рассматривать как соответствующую особенностям социально-экономических процессов, перечисленных во Введении. Проведенный анализ является следующим шагом в статистическом оценивании данных о выручке российских компаний, часть предыдущих результатов приведена в работе [3]. Далее будут рассмотрены только основные результаты, раскрывающие применяемую методологию (экономическая трактовка результатов будет представлена в статье А.Ю. Юданова и автора). Помимо демонстрации предлагаемого метода в ходе его применения получены интересные результаты об особенностях развития российских компаний.

Анализ построен таким образом, что в ходе его достигаются две цели: благодаря применению

предлагаемого метода для описания разных по динамике ситуаций демонстрируется его широкая эффективность, а также выявляются основные закономерности изменения выручки российских компаний, позволяющие классифицировать компании по динамике развития.

Анализируются содержащиеся в системе «СПАРК-Интерфакс» данные по российским компаниям, которые существовали, как минимум, с 2009 г., и в 2015 г. их выручка была не менее 200 млн. руб. Всего таких компаний в Российской Федерации оказалось 38 410, именно все их данные и использованы в анализе.

Специфика рассматриваемого анализа в том, что необходимо обработать данные при малом числе годовых измерений. Зато есть большие по объему данные за каждый год (более 38 тыс. компаний). Это позволяет, для уменьшения дисперсий оценок, применять медианные оценки в каждой, достаточно большой группе, на которые разбиваются компании. Для непрерывного описания всех российских компаний как единого целого и демонстрации возможностей предлагаемого метода для разных условий принцип разбиения компаний на группы таков: все компании разбиваются в зависимости от темпов прироста выручки за период с 2010 по 2015 г. на шестнадцать одинаковых по размерам взаимно пересекающихся групп. Группы формировались в зависимости от значений процентилей темпов прироста выручки для всей совокупности компаний (табл. 1). Размер каждой группы 25 % общего числа компаний (что составляет 9602 компании в каждой группе). Принцип формирования двух соседних групп: из группы с меньшим диапазоном темпов прироста исключаются

пять процентов компаний (общего числа компаний) с наименьшими темпами прироста, взамен в новую группу добавляется пять процентов компаний со следующими по значению темпами прироста. Каждые из соседних групп перекрываются, имея одинаковыми 20 % общего числа компаний. Две ближайшие группы отличаются между собой на 1920 компаний, что составляет пять процентов общего числа компаний в российской экономике, отвечающих выбранному критерию. Можно сказать, что каждый раз при переходе к следующей группе происходит сдвиг на пять процентилей. В ходе анализа применяется шестнадцать раз однотипная обработка и сравниваются полученные результаты. Такие многократные повторы соответствуют применению метода в различных ситуациях как для растущих, так и для уменьшающихся по выручке компаний. Поскольку для описания каждой группы применяются медианные оценки, то большой объем группы позволяет существенно, почти на два порядка, уменьшить дисперсию оценок по сравнению с дисперсией в группе. Результаты расчетов медиан выручки для каждой группы с 2009 по 2015 г. приведены в табл. 1.

Главная задача анализа, приведенного в данной статье, — демонстрация на реальных данных возможностей предлагаемого метода. Перед нами стоит задача пойти в анализе представленных данных дальше коэффициентов регрессионных моделей благодаря глубокой их интерпретации, что позволило бы получить представление о характере динамики выручки компаний на различных этапах их жизненного цикла.

Рассмотрим подходы к решению подобных задач. С учетом дискретности измерений анализ

Таблица 1

Медианы выручки (млн руб.) по группам компаний
(группы образованы в зависимости от процентилей темпов прироста выручки всех компаний за период с 2010 по 2015 г.)

Группы компаний с темпами прироста, процентиля	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
менее 25-го	449	578,7	637,8	636,8	596,6	547,9	448
30—5	378,3	457,8	532,3	550,9	541,5	521,2	468,4
35—10	344,8	416	491,2	520,3	525,3	518,6	489,6
40—15	321,9	387	464,6	501,6	514	520,2	505,9
45—20	304,8	370,8	450,7	493,3	514,2	529,5	530
50—25	284	346,2	431,4	480,3	507,3	535,2	543
55—30	269	331,2	419,9	473,4	506,7	546,8	562,6
60—35	245,5	305,3	400,5	457,9	492,9	541,8	567,3
65—40	225,5	279,5	375,8	438,3	480,5	534,7	568,4
70—45	204,5	253,8	351,4	419,8	465,6	524,3	571,6
75—50	178,3	226,2	327	395,6	446,5	516	573,3
80—55	153,3	192,7	295,4	367,3	424,9	499,5	567,4
85—60	127,5	162,4	260,1	338	403,3	483,6	562,3
90—65	103,6	128,8	229,7	311	382,6	467,7	560,9
95—70	78,4	90,5	187,7	269,6	345,9	435,4	543,7
более 75-го	55,7	56,4	147,4	234,6	312,3	418,4	544,9



эмпирических данных социально-экономических процессов в общем случае можно отнести к анализу временных рядов. Общие методы анализа временных рядов хорошо освоены и широко применяются, они представлены, например, в справочнике [4], а взгляд на анализ временных рядов с позиций эконофизики и социофизики рассмотрен в работе [5]. Очень широко применяются линейные стохастические модели, например, модели авторегрессии, полиномиальные или скользящего среднего [6]. Применению методов регрессионного анализа с применением полиномов для описания нелинейной динамики, например, посвящена работа [7]. Но интерпретация полученных статистических результатов затруднена как в силу абстрактности принятых моделей, так и в силу необходимости рассматривать результаты, полученные линейными методами применительно к нелинейным процессам. Часто для анализа нелинейных процессов применяют и другой подход, заключающийся в построении нелинейных динамических моделей, как правило, в виде отображений или дифференциальных уравнений, реализующих идеи и методы нелинейной динамики. Категории нелинейной динамики позволяют в случае отображений описать сложную динамику простыми детерминированными нелинейными моделями. Применение подходов нелинейной динамики приводит к новым концепциям в анализе временных рядов, которые могут привести к более глубокому пониманию анализируемых процессов. Применяя в анализе специально подобранные нелинейные модели, можно получить новый взгляд на структуры временных рядов. Такой подход описан в книге [8], а в работе [9] приведены конкретные примеры нелинейного анализа с помощью специального пакета программ. В работе [10] рассматриваются подходы к выявлению бизнес-циклов при помощи параметрических нелинейных моделей временных рядов. Во всех рассмотренных нелинейных подходах используется априорная или постулируемая информация о законах генерации данных. Для многих социально-экономических процессов и, в частности, для рассматриваемого нами примера такой подход мало применим в силу отсутствия достоверной априорной информации.

Ни в одной из упомянутых работ нет попыток переходов от результатов, полученных методами регрессионного анализа, к интерпретации их в категориях нелинейной динамики.

С учетом особенностей процессов и для обеспечения взаимосвязи моделей регрессионного анализа и нелинейной динамики целесообразно в качестве базовых моделей воспользоваться нелинейными отображениями, позволяющими связать коэффициенты регрессии и параметры отображений. Тогда полученные в ходе регрессионного ана-

лиза результаты можно интерпретировать в дальнейшем с позиций нелинейной динамики.

Цитата из работы [11] объясняет целесообразность применения отображений: «Переход от непрерывной системы m дифференциальных уравнений к $(m - 1)$ -мерному отображению в ряде задач очень полезен. Прежде всего потому, что о многих нелинейных явлениях гораздо проще говорить на языке дискретных отображений, чем на языке непрерывных динамических систем. Кроме того, многие системы дифференциальных уравнений порождают похожие отображения. Поэтому сейчас часто одномерные и двумерные отображения рассматривают как упрощенные модели различных процессов».

Для реализации предлагаемого подхода необходимо на первом этапе анализа выбрать детерминированные модели нелинейной динамики, которые могут рассматриваться как альтернативные. Эти модели представляют собой нелинейные отображения, описывающие анализируемый процесс в виде последовательности значений, когда последующие значения зависят от предыдущих. При дискретности измерений социально-экономических процессов, протекающих в быстроменяющейся среде, для анализа доступно малое число данных, что видно и в табл. 1 (данные ранее 2009 г. нельзя использовать в силу их неоднородности с анализируемым временным участком: кризис 2008 г. резко поменял картину), это налагает ограничения на возможное число неизвестных коэффициентов регрессионных моделей. Соответственно, здесь не подходят для описания и анализа сложные базовые отображения, содержащие очень много параметров.

Как уже было отмечено, отображения должны отвечать важному условию: путем преобразований из них можно получить линейную модель регрессионного анализа. В рассмотренных далее нелинейных отображениях такой переход удается реализовать, преобразовав значения анализируемого процесса в значения их темпов прироста. Это преобразование позволяет перейти от базовых нелинейных отображений к линейным (по неизвестным коэффициентам) регрессионным моделям, описывающим закономерности изменения темпов прироста. На основе коэффициентов регрессионной модели можно будет оценить параметры базовых нелинейных отображений и проводить дальнейший анализ динамики процессов с учетом их свойств.

Изменения выручки компаний протекают в соответствии с сформулированными выше особенностями социально-экономических процессов, позволяющими воспользоваться базовыми нелинейными моделями: размер (по выручке) рыночной ниши определяет ограничения процессов,

приращения выручки зависят от достигнутых значений. Поэтому для анализа данных о выручке российских компаний предлагается воспользоваться базовым нелинейным отображением, назовем его комбинированным, соответствующим специфике динамики выручки. В нем комбинируется влияние на динамику текущей ситуации и предыстории. В ходе анализа динамики выручки компаний вполне естественно учесть влияние на будущие результаты предыдущих состояний компании. При таких условиях для анализа динамики выручки целесообразно описать будущее значение выручки X_{n+1} отображением:

$$X_{n+1} = X_n + X_n A_{comb} (K_{comb} - \rho_{comb} X_n - \rho_{comb lag1} X_{n-1} - \rho_{comb lag2} X_{n-2} - \dots), \quad (1)$$

где n — дискретное время, выраженное в шагах отображения (в нашем случае это годы отчетности компаний), A_{comb} — интенсивность изменения выручки при отсутствии ограничений, K_{comb} — ограничение динамики выручки, связанное с размером рыночной ниши, $\rho_{comb lag i}$ — соответствующие масштабирующие коэффициенты значений процесса, характеризующие влияние текущего состояния и предыстории (их знаки отражают усиление или уменьшение влияния ограничения). Выражение в скобках описывает влияние ограничения на приращение выручки — чем меньше его значение, тем меньше приращение. При существовании компании в рыночной нише приращение выручки будет зависеть от оставшейся незанятой части ниши и возможности ее расширения или уменьшения, именно этот факт отражает выражение в скобках.

Аналогично альтернативным полиномиальным моделям в регрессионном анализе, где рассматриваются модели с разными степенями, в случае отображения (1) можно считать, что альтернативные модели включают в себя слагаемые с разными лагами. Комбинированное отображение (1) с разными значениями масштабирующих коэффициентов позволяет рассматривать целый класс альтернативных моделей как хорошо исследованных, так и с неисследованными свойствами. Так, отображение Ферхюльста [12] является частным случаем комбинированного отображения ($\rho_{comb} = 1$, а все остальные коэффициенты равны нулю), а при $\rho_{comb lag} = 1$ и равенстве всех остальных коэффициентов нулю комбинированное отображение становится логистическим отображением с запаздыванием.

При отображении (1) в анализе возникает проблема: какие члены отображения необходимы для описания конкретного процесса изменения выручки компаний. Фактически речь идет о поиске наиболее адекватной модели исследуемого нелинейного процесса. Оценить степень адекватности

альтернативных моделей позволяют методы регрессионного анализа, в частности, оценки их коэффициентов детерминации. Для такого подхода нам необходимо преобразовать отображение (1) в линейную модель регрессионного анализа. Для перехода от нелинейного комбинированного отображения к линейной модели регрессионного анализа перенесем X_n в левую часть отображения (1) и разделим левую и правую части на X_n . В результате, раскрыв скобку, получим:

$$\frac{X_{n+1} - X_n}{X_n} = A_{comb} K_{comb} - A_{comb} \rho_{comb} X_{n1} - A_{comb} \rho_{comb lag1} X_{n-1} - A_{comb} \rho_{comb lag2} X_{n-2} - \dots \quad (2)$$

В левой части получилось выражение для темпов прироста процесса, обозначим его:

$$\frac{X_{n+1} - X_n}{X_n} = \omega_{n+1} \quad (3)$$

Тогда выражение (2) с учетом обозначения (3) представляет собой описание зависимости изменения темпов прироста нелинейного процесса. Эти зависимости для анализируемого временного интервала можно представить в виде линейной модели регрессионного анализа, описывающей тенденцию изменения темпов прироста процесса. Такая модель получена на основе базового отображения (1):

$$\omega_{n+1} = A_{comb reg} K_{comb reg} - A_{comb reg} \rho_{comb} X_n - A_{comb reg} \rho_{comb lag1} X_{n-1} - A_{comb reg} \rho_{comb lag2} X_{n-2} - \dots + e_n, \quad (4)$$

где $A_{comb reg}$ — средняя за рассматриваемый временной интервал интенсивность процесса², $K_{comb reg}$ — среднее значение ограничения процесса, а e_n — случайное возмущение. Переход от отображения (2), полученного преобразованием базового отображения (1), к модели регрессионного анализа (4) заключается не только в использовании новых переменных с дополнительным индексом. Этот переход позволяет установить взаимосвязь параметров базовых нелинейных моделей и коэффициентов регрессии. На основе эмпирических данных мы можем получить оценки коэффициентов в линейной модели регрессионного анализа:

$$\omega_{n+1} = \text{const}_{comb} + \zeta_{comb} X_n + \zeta_{comb lag1} X_{n-1} + \zeta_{comb lag2} X_{n-2} + \dots + \xi_{n comb}, \quad (5)$$

где ζ — коэффициенты линейной модели регрессионного анализа.

² В настоящей статье средние значения параметров нелинейных отображений, оценки которых получены с помощью методов регрессионного анализа, снабжены дополнительным индексом «reg».



Регрессионные модели (4) и (5) оказываются эквивалентными, их коэффициенты связаны соотношениями: const_{comb} это оценка $A_{comb\ reg} K_{comb\ reg}$ и т. д. Точность предлагаемой модели в описании эмпирических данных с поправкой на объем исходной выборки и сложность модели (число неизвестных параметров) можно оценить значением скорректированного коэффициента детерминации R^2 .

Казалось бы, что нового принесет подход, когда в качестве основного рабочего инструмента у нас выступает линейная модель регрессионного анализа? Но теперь, с учетом базовой модели, все коэффициенты линейной регрессии оказываются взаимосвязаны в рамках нелинейной базовой модели, позволяющей интерпретировать результаты расчетов в категориях нелинейной динамики. В качестве первого шага в интерпретации коэффициентов регрессии следует обратить внимание на то, что значение константы в регрессионной модели является оценкой произведения интенсивности процесса на его ограничение $A_{comb\ reg} K_{comb\ reg}$. Это произведение можно рассматривать как оценку нормированной интенсивности процесса. Нормировка заключается в делении левой и правой частей отображения (1) на ограничение процесса K_{comb} , что делает значение ограничения процесса в новой записи равным единице, а значения самого процесса выражаются в долях ограничения. Это позволяет сопоставлять по нормированной интенсивности процессы с разными значениями ограничений. Кроме того, динамика очень многих нелинейных отображений определяется значением нормированной интенсивности, например, применимая для многих классов отображений теория универсальности Фейгенбаума базируется на значениях нормированных интенсивностей [11, 13].

Свойствам нелинейных отображений и методам их исследования посвящены многие работы, например, [11–13]. Отметим в качестве классической работы статью [13], результаты которой привели к созданию «теории универсальности», обобщающей свойства многих классов нелинейных систем. Это позволяет применять в анализе как простых, так и сложных систем одинаковые базовые модели. Однако, в силу многообразия нелинейных отображений, свойства даже достаточно простых отображений не всегда исследованы. В ходе анализа реальных процессов может возникнуть необходимость применять отображения с неизвестными свойствами. Общие подходы к анализу свойств отображений описаны в работах [2, 14].

В зависимости от знаков коэффициентов регрессии модель (5) может описывать как влияние положительных для развития процесса факторов, обеспечивающих большой рост благодаря умень-

шению влияния ограничений, так и обратный эффект. В нашем анализе факторами служат данные о предыстории (лаговые значения процесса). Знаки коэффициентов слагаемых, связанных со значениями процесса, несут информацию о соотношениях благоприятных и неблагоприятных для динамики выручки факторов, а сравнение значений регрессионных стандартизированных коэффициентов (бета-коэффициентов) позволяет оценивать значимости воздействующих на процесс факторов.

Воспользуемся описанным подходом для анализа динамики выручки российских компаний. На основании данных, приведенных в табл. 1, рассчитаны темпы прироста медиан выручки в каждой группе, значения которых также использовались в регрессионном анализе, они приведены в табл. 2.

Коэффициенты регрессионных моделей (4) определяются для каждой группы в соответствии с данными, приведенными в табл. 1 и 2.

Как показали расчеты альтернативных моделей регрессионного анализа для всей совокупности групп компаний, оптимальными по структуре оказались линейные модели регрессионного анализа, включающие в себя лишь текущее и предыдущее значения выручки:

$$\omega_{n+1} = \text{const}_{comb} + \zeta_{comb} X_n + \zeta_{comb\ lag1} X_{n-1} + \xi_{n\ comb} \quad (6)$$

Оценить точность регрессионных моделей, соответствующих структуре (6), для каждой группы можно по данным табл. 3, где приведены оценки коэффициента детерминации «скорректированный R^2 ». Там же приведены результаты дисперсии

Таблица 2

Темпы прироста медиан выручки по группам компаний

Группы компаний с темпами прироста, проценты	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
менее 25-го	0,1	0	-0,06	-0,08	-0,18
30–5	0,16	0,03	-0,02	-0,04	-0,1
35–10	0,18	0,06	0,01	-0,01	-0,06
40–15	0,2	0,08	0,02	0,01	-0,03
45–20	0,22	0,09	0,04	0,03	0
50–25	0,25	0,11	0,06	0,06	0,01
55–30	0,27	0,13	0,07	0,08	0,03
60–35	0,31	0,14	0,08	0,1	0,05
65–40	0,34	0,17	0,1	0,11	0,06
70–45	0,38	0,19	0,11	0,13	0,09
75–50	0,45	0,21	0,13	0,16	0,11
80–55	0,53	0,24	0,16	0,18	0,14
85–60	0,6	0,3	0,19	0,2	0,16
90–65	0,78	0,35	0,23	0,22	0,2
95–70	1,07	0,44	0,28	0,26	0,25
более 75-го	1,61	0,59	0,33	0,34	0,3

онного анализа по проверке гипотезы, что рассматриваемая в каждой группе зависимость линейная. Гипотеза проверяется на основании F -критерия, по значениям которого оценивается значимость нулевой гипотезы об отсутствии линейной зависимости.

Оценки «скорректированный R^2 » для всех групп компаний заключены в диапазоне 0,791...0,996. Такие значения говорят о высокой объясняющей способности предлагаемых моделей регрессионного анализа на базе комбинированного отображения (6). Представленные результаты расчетов дисперсионного анализа по проверке гипотезы о линейности регрессионных моделей (F -критерий и оценка значимости нулевой гипотезы об отсутствии линейной зависимости) позволяют утверждать (с учетом сильной взаимосвязанности данных по группам компаний), что применимость линейной модели регрессионного анализа для любой из групп допустима: значимость нулевой гипотезы в каждой группе мала, и линейные модели обладают достаточно высокой аппроксимирующей точностью.

Таким образом, тип моделей регрессионного анализа говорит нам о том, что для интерпретации их коэффициентов целесообразно воспользоваться базовой моделью в виде двумерного нелинейного отображения. Чтобы продолжить анализ в категориях нелинейной динамики с помощью регрессионных коэффициентов нам необходимо знать свойства двумерных отображений и как оценить эти свойства через коэффициенты регрессионных моделей.

Таблица 3

Оценки коэффициентов детерминации и значимости нулевой гипотезы об отсутствии линейной зависимости для регрессионных моделей каждой из групп

Группы компаний с темпами прироста, проценты	Скорректированный R^2	F -критерий	Значимость нулевой гипотезы
менее 25-го	0,85	12,374	0,075
30—5	0,804	9,207	0,098
35—10	0,916	22,929	0,042
40—15	0,971	67,294	0,015
45—20	0,996	514,341	0,002
50—25	0,984	127,939	0,008
55—30	0,955	43,194	0,023
60—35	0,896	18,264	0,052
65—40	0,899	18,855	0,05
70—45	0,866	13,898	0,067
75—50	0,791	8,587	0,104
80—55	0,805	9,255	0,098
85—60	0,843	11,762	0,078
90—65	0,855	12,83	0,072
95—70	0,876	15,082	0,062
более 75-го	0,848	12,136	0,076

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛЕЙ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ДВУМЕРНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

На основании оценок, полученных в ходе регрессионного анализа, мы определили, что для анализа динамики выручки в базовом отображении (1) необходимо учитывать только текущее и лаговое значения. Рассмотрим, как можно определить свойства оптимального для нашего анализа базового отображения и оценить их на основании полученных значений коэффициентов регрессионных моделей. Базовым для регрессионной модели (6) служит комбинированное отображение в виде:

$$X_{n+1} = X_n + X_n A_{comb} (K_{comb} - \rho_{comb} X_n - \rho_{comb lag} X_{n-1}), \quad (7)$$

где A_{comb} — интенсивность комбинированного отображения, K_{comb} — ограничение комбинированного отображения, ρ_{comb} — масштабирующий коэффициент текущего значения процесса, $\rho_{comb lag}$ — масштабирующий коэффициент предыдущего значения процесса.

При ненулевых масштабирующих коэффициентах свойства двумерного комбинированного отображения сильно отличаются от свойств одномерных отображений как Ферхюльста, так и логистического с запаздыванием, несмотря на то, что его можно трактовать как комбинацию этих двух простых отображений. Свойства двумерного комбинированного отображения не исследовались. Поэтому рассмотрим его основные свойства в общем виде. Одна из важных особенностей любого отображения состоит в наличии особых (неподвижных) точек, в которых процессы останавливаются. Значения координат особых точек соответствуют значениям величины, характеризующей процесс — в нашем случае значениям выручки. Далее для краткости будем говорить о значениях особых точек. Значения особых (неподвижных) точек в нашем анализе динамики выручки можно трактовать как «потенциал развития компании» или, в общем виде, как «цели процесса», кроме того, представляют интерес оценки устойчивости особых точек.

Будем применять общие методы исследования свойств нелинейных отображений, изложенные в работах [2, 14]. Для этого отображение (7) удобно представить в двумерном виде:

$$\begin{cases} X_{n+1} = X_n + X_n A_{comb} \times \\ \times (K_{comb} - \rho_{comb} X_n - \rho_{comb lag} Y_n), \\ Y_{n+1} = X_n. \end{cases} \quad (8)$$



Свойства особых точек комбинированного отображения (8) будем определять в соответствии с методами, применимыми для двумерных отображений. На первом этапе определяются значения особых (неподвижных) точек. Для нахождения особых точек подставим в систему отображений (8) условия остановки процессов $X_i^* = X_{n+1} = X_n$ и $Y_i^* = Y_{n+1} = Y_n$, в результате получим:

$$\begin{cases} X_i^* A_{comb} (K_{comb} - \rho_{comb} X_i^* - \rho_{comb} lag Y_i^*) = 0, \\ Y_i^* = X_i^*. \end{cases} \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9), получаем значения двух особых точек: одна из них нулевая, т. е. $X_1^* = 0$ и $Y_1^* = 0$; значения другой:

$$X_2^* = \frac{K_{comb}}{\rho_{comb} + \rho_{comb} lag} \text{ и } Y_2^* = \frac{K_{comb}}{\rho_{comb} + \rho_{comb} lag}. \quad (10)$$

Вполне естественно, что для комбинированного отображения (7) значения особых точек X_i^* и Y_i^* одинаковы, ведь в особой точке текущее и лаговое значения совпадают. Для понимания характера динамики процессов крайне важно знать поведение процесса вблизи особой точки. Если процесс, находясь вблизи особой точки, на каждом шаге приближается к ней, то особая точка устойчива. Термин «особая точка и ее устойчивость», вообще-то подразумевает поведение процесса за бесконечное время, но окрестности особой точки реальные процессы могут достигать быстро, а вся дальнейшая динамика в районе особой точки определяет ее устойчивость.

Для анализа устойчивости особых точек необходимо составить матрицу Якоби системы уравнений (8):

$$\begin{vmatrix} \left(\begin{array}{cc} 1 + A_{comb} K_{comb} - & -A_{comb} \rho_{comb} lag X \\ -2A_{comb} \rho_{comb} X - A_{comb} \rho_{comb} lag Y & \end{array} \right) & \\ 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Область устойчивости особых точек удобно представить в осях якобиана J и следа S матрицы Якоби в виде треугольника устойчивости [14]. Это графическое представление универсального сценария устойчивости двумерных отображений. Координаты вершин треугольника: нижняя вершина $J = -1$, $S = 0$; верхняя левая $J = 1$, $S = -2$; верхняя правая $J = 1$, $S = 2$. Треугольник определяет зону устойчивости особых точек. Выход за левую границу треугольника соответствует потере устойчивости, приводящей к колебаниям, либо переход к аттрактору «бесконечность» (это так назы-

ваемый жесткий переход через мультипликатор, равный -1). Выход за правую границу треугольника устойчивости соответствует смене особой точки. Выход за верхнюю границу приводит к сложной динамике, в частности, к квазигармоническим колебаниям.

Для комбинированного отображения (10) якобиан

$$J = A_{comb} \rho_{comb} lag X, \quad (11)$$

а след

$$S = 1 + A_{comb} K_{comb} - 2A_{comb} \rho_{comb} X - A_{comb} \rho_{comb} lag Y. \quad (12)$$

Для первой, нулевой особой точки, подставив ее значения $X_1^* = 0$ и $Y_1^* = 0$, получим: $J_1 = 0$, $S_1 = 1 + A_{comb} K_{comb}$. Такие значения якобиана соответствуют вырождению треугольника устойчивости в отрезок прямой. Поэтому условие устойчивости нулевой особой точки имеет вид:

$$|1 + A_{comb} K_{comb}| < 1 \text{ или } -2 < A_{comb} K_{comb} < 0.$$

Рассмотрим теперь ситуацию со второй, ненулевой особой точкой (10).

Подставляя выражения для второй особой точки в формулы (11) и (12), получим:

$$J_2 = \frac{\rho_{comb} lag}{\rho_{comb} + \rho_{comb} lag} A_{comb} K_{comb},$$

$$S_2 = 1 + A_{comb} K_{comb} - 2 \frac{\rho_{comb}}{\rho_{comb} + \rho_{comb} lag} A_{comb} K_{comb} - \frac{\rho_{comb} lag}{\rho_{comb} + \rho_{comb} lag} A_{comb} K_{comb}.$$

Посмотрим, как на основе значений коэффициентов регрессии можно определить значения координат особых точек и их устойчивость. С учетом соотношений коэффициентов моделей (4) и (5) можно записать равенства коэффициентов регрессии и оценок средних параметров базовых моделей: $\text{const}_{comb} = A_{comb reg} K_{comb reg}$; $\zeta_{comb} = -A_{comb reg} \rho_{comb}$; $\zeta_{comb lag} = -A_{comb reg} \rho_{comb lag}$. С учетом этих равенств якобиан и след матрицы могут быть выражены через коэффициенты регрессии, это позволяет определять значения координат особых точек и анализировать их устойчивость непосредственно по полученным коэффициентам регрессии. Для первой, нулевой особой точки, $X_1^* = 0$:

$$J_1 = 0 \text{ и } S_1 = 1 + A_{comb} K_{comb} = 1 + \text{const}_{comb}. \quad (13)$$

Для второй, ненулевой особой точки:

$$X_2^* = \frac{K_{comb}}{\rho_{comb} + \rho_{comb\ lag}} = -\frac{\text{const}_{comb}}{\zeta_{comb} + \zeta_{comb\ lag}}, \quad (14)$$

$$J_2 = \frac{\rho_{comb\ lag}}{\rho_{comb} + \rho_{comb\ lag}} A_{comb} K_{comb} = \\ = \frac{\zeta_{comb\ lag}}{\zeta_{comb} + \zeta_{comb\ lag}} \text{const}_{comb}, \quad (15)$$

$$S_2 = 1 + \text{const}_{comb} - 2 \frac{\zeta_{comb}}{\zeta_{comb} + \zeta_{comb\ lag}} \text{const}_{comb} - \\ - \frac{\zeta_{comb\ lag}}{\zeta_{comb} + \zeta_{comb\ lag}} \text{const}_{comb}. \quad (16)$$

Таким образом, по значениям коэффициентов регрессии можно рассчитать значения особых точек, якобиана, следа матрицы и оценить устойчивость особых точек. Кроме того, появляется возможность моделировать дальнейшее развитие процесса, используя реальные значения процесса и параметры нелинейной базовой модели, определенные по коэффициентам регрессии.

3. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОМПАНИЙ

В табл. 4 приведены значения коэффициентов линейных регрессионных моделей для каждой из групп и оценки значений ненулевых особых точек, рассчитанных по формуле (14). Оценки устойчивости получены путем расчета якобиана и следа

матрицы по формулам (15) и (16). Для группы компаний с темпами прироста «менее 25-го перцентиля», как будет показано ниже, целесообразно рассматривать модель без константы (значение константы оказывается статистически незначимым и выпадающим из общего ряда оценок для других групп). Отсутствие константы в модели для этой группы соответствует движению типичной компании к нулевой особой точке. Расчеты для такого случая осуществлялись по формуле (13).

Полученные результаты позволяют оценить взаимосвязанность однотипных коэффициентов регрессионных моделей различных групп компаний. В качестве первого шага оценим взаимосвязанность значений констант. Оценки констант регрессионных моделей в рамках предлагаемого подхода являются и оценками нормированных интенсивностей процессов, их значения можно сравнивать между собой независимо от уровня ограничений процессов. В исходном отображении (7) выражение нормированной интенсивности определяется как $A_{comb} K_{comb}$. Переходя к средним значениям за рассматриваемый период $A_{comb\ reg} K_{comb\ reg}$, получаем оценку средней нормированной интенсивности процесса, описываемого моделью регрессионного анализа.

На рис. 1 представлен график изменения констант в регрессионных моделях при переходе от группы самых быстрорастущих компаний к группам с отрицательными темпами прироста выручки (по оси абсцисс отложены соответствующие этим группам перцентили).

Таблица 4

Коэффициенты регрессионных моделей, оценки значений особых точек и их устойчивости для каждой из групп компаний

Группы компаний с темпами прироста, перцентили	const _{comb}	Коэффициент		Значение X_2^* , млн руб.	Устойчивость особой точки
		при текущем значении ζ_{comb}	при предыдущем значении $\zeta_{comb\ lag}$		
менее 25-го	0(-0,307)	0,0017	-0,0013	$X_i^* = 0$	на границе устойчивости
30—5	0,516	0,0004	-0,0014	489,6	устойчива
35—10	0,703	-0,0006	-0,0008	500,1	
40—15	0,786	-0,0014	-0,0001	511,6	
45—20	0,787	-0,0019	0,0004	536,5	
50—25	0,775	-0,0022	0,0008	559,2	
55—30	0,748	-0,0024	0,0011	597	неустойчива
60—35	0,75	-0,0025	0,0012	609,6	
65—40	0,735	-0,0026	0,0015	634,9	
70—45	0,731	-0,0027	0,0016	657,9	
75—50	0,759	-0,0031	0,002	700,8	
80—55	0,814	-0,0036	0,0025	743,8	
85—60	0,855	-0,0042	0,0032	839,7	
90—65	1,007	-0,0054	0,0043	915,8	
95—70	1,225	-0,0077	0,0065	1092,5	
более 75-го	1,603	-0,0116	0,0108	2014,2	

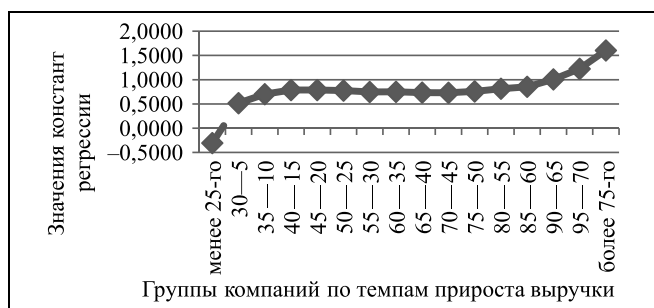


Рис. 1. Значения констант в регрессионных моделях, характеризующих средние нормированные интенсивности процессов изменения выручки для различных групп компаний

Видно, что значения констант лежат на достаточно плавной кривой, за исключением константы регрессионной модели группы компаний с темпами прироста «менее 25-го перцентиля». Обособленность параметра этой группы компаний при визуальном анализе графика подтверждается и статистической проверкой гипотез о равенстве констант нулю: результаты ее показывают, что ненулевыми можно рассматривать все значения констант, за исключением константы в модели группы «менее 25-го перцентиля». Для регрессионной модели этой группы компаний значимость гипотезы о равенстве константы нулю оказалась высокой (0,44), целесообразно рассматривать в дальнейшем именно нулевое значение константы. Равенство константы нулю говорит о том, что единственная модель с параметрами группы «менее 25-го перцентиля» имеет нулевую особую точку — это модель исчезающих компаний. Существование такой непохожей на все остальные группы порождает ряд особенностей в дальнейшем анализе: коэффициенты регрессионной модели для группы «менее 25-го перцентиля» нельзя сравнивать с другими, так как модели оказываются разными по типу, кроме того, нельзя сравнивать и коэффициенты детерминации этой группы с другими. В дальнейшем сравнительный анализ параметров для разных групп будет проводиться без группы «менее 25-го перцентиля».

Значения коэффициентов регрессионных моделей при текущем значении процессов ζ_{comb} и при предыдущем значении $\zeta_{comb\ lag}$ представлены на рис. 2.

На рис. 2 видны достаточно плавные изменения значений регрессионных коэффициентов. Плавности изменения оценок констант и коэффициентов от группы к группе свидетельствуют о применимости метода для различных типов динамики, так как в совокупности российских компаний есть группы с разной динамикой. Коль скоро значения регрессионных коэффициентов демонстрируют взаимосвязанность в виде плавных изменений

для соседних групп, то есть все основания продолжить анализ в оценках параметров нелинейных отображений. Дальнейшие возможности интерпретации результатов регрессионного анализа являются с применением новых оценок, относящихся к моделям нелинейных процессов, полученных расчетным путем на основе регрессионных коэффициентов. Именно это переход в анализе моделей регрессии был бы невозможен без нелинейных базовых моделей.

Рассмотрим график зависимости оценок значений особых точек, рассчитанных по формуле (14), от значений нормированной интенсивности (это значения констант в регрессионных моделях), приведенный на рис. 3. Он построен на основании данных табл. 4. Значения особых точек для каждой из групп компаний можно рассматривать как «оценки потенциальных возможностей роста».

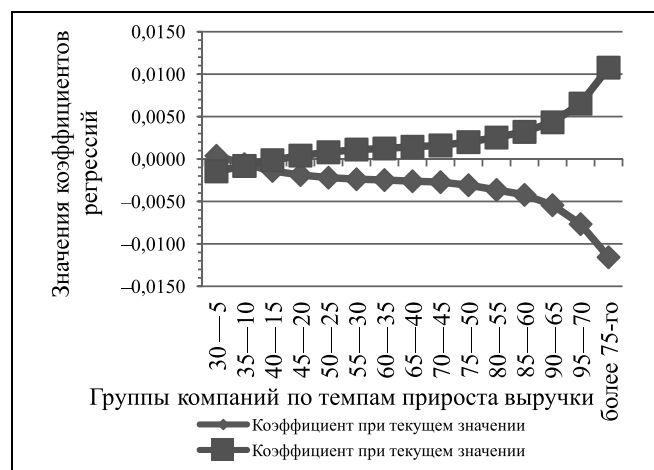


Рис. 2. Значения коэффициентов регрессионных моделей при текущем значении процессов (ζ_{comb}) при предыдущем значении ($\zeta_{comb\ lag}$) для различных групп компаний (значения коэффициентов модели группы компаний «менее 25-го перцентиля» не представлены)

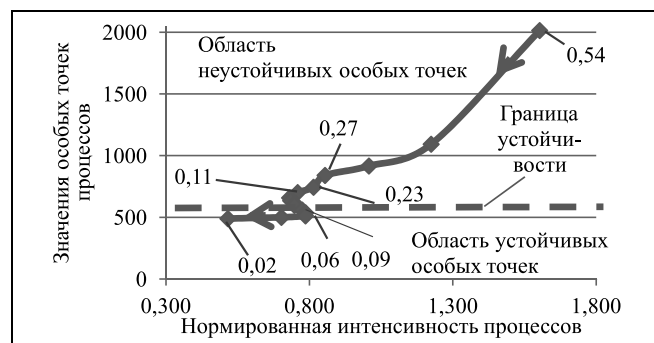


Рис. 3. Зависимость оценок значений особых точек (потенциалов роста выручки) от нормированной интенсивности нелинейных процессов: стрелками обозначены направления уменьшения темпов прироста выручки

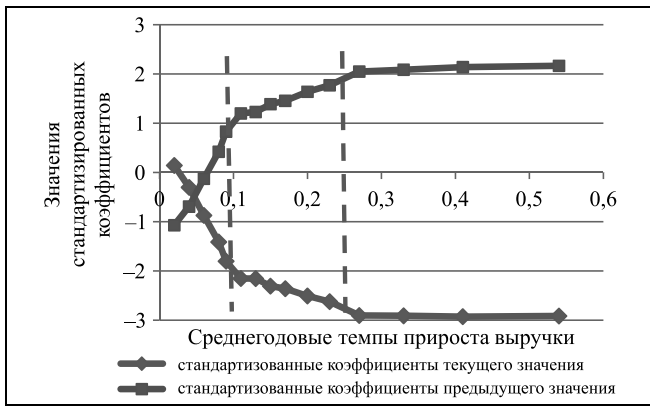


Рис. 4. Значения стандартизованных коэффициентов регрессионных моделей для групп компаний в зависимости от среднегодовых темпов прироста: точка, соответствующая группе «более 75-го перцентиля» — крайняя справа, точка, соответствующая группе «30—5 перцентилей» — крайняя слева; штриховые вертикальные линии разделяют области качественно однородных структур коэффициентов (с примерно линейными зависимостями значений стандартизованных коэффициентов от среднегодовых темпов прироста)

Кроме того, на кривой отмечены среднегодовые темпы прироста выручки для различных групп компаний. Уменьшение значений среднегодовых темпов прироста соответствует последовательным переходам к менее динамичным группам (направления переходов отмечены стрелками): значение 0,54 соответствует среднегодовым темам прироста группы «более 75-го перцентиля»; значение 0,02 — группе «30—5 перцентилей». Дальнейшее уменьшение темпов прироста менее 0,02 соответствует развитию процесса к нулевой особой точке. На рисунке показана также граница устойчивости особых точек.

Данный график можно рассматривать как качественную картину нескольких этапов жизненного цикла типичных компаний российского бизнеса (с важной оговоркой: при неизменности условий развития), описываемую с позиции нелинейных процессов. Для более четкой классификации компаний воспользуемся другими результатами регрессионного анализа: рассмотрим значения стандартизованных коэффициентов (бета-коэффициентов) в зависимости от среднегодовых темпов прироста выручки для каждой из групп компаний, они представлены на рис. 4. Переход в анализе регрессионных моделей к стандартизованным коэффициентам необходим для возможности их сравнения между разными группами компаний.

На рис. 4 отчетливо выделяются три совокупности значений стандартизованных коэффициентов моделей — границы между ними обозначены штриховыми вертикальными линиями. Они отражают разные механизмы прироста выручки компаний. В причинах столь яркого разделения

стандартизованных коэффициентов моделей в дальнейшем еще предстоит разобраться, но эффект безусловно выражен.

К первой совокупности, включающей примерно 40 % российских компаний, относятся компании со среднегодовыми темпами прироста выручки не менее 0,27. В этой совокупности по мере уменьшения темпов прироста, стандартизованные коэффициенты моделей уменьшаются незначительно. Следует обратить внимание, что полученная в результате анализа верхняя граница темпов прироста выручки совокупности быстрорастущих компаний, составляющей 56 % общего числа компаний, близка к аналогичной границе так называемых «газелей», для которых темпы прироста должны быть 30 % и более в течение пяти лет [15], но если взять для «газелей» оценки средних темпов прироста, то они оказываются близки к рассматриваемым значениям. Возвращаясь к графикам на рис. 4, можно сказать, что после кризиса 2008 г. примерно 40 % российских компаний начали быстро расти — они относятся к первой совокупности компаний. Такое заключение можно сделать с учетом, что темпы прироста выручки компаний оценивались за период с 2010 по 2015 г. У второй совокупности моделей по мере уменьшения темпов прироста значения стандартизованных коэффициентов уменьшаются быстрее, чем у первой. Ко второй совокупности относятся примерно 30 % общего числа компаний. Это компании со среднегодовыми темпами прироста от 0,23 до 0,11. Механизм роста выручки этих компаний принципиально отличается от быстрорастущих компаний. Эти две совокупности моделей объединяет только то, что они имеют неустойчивые особые точки. Третья совокупность моделей соответствует наименее динамичным компаниям. Она начинается со среднегодовых темпов прироста 0,09 до 0,02, к ней относятся примерно 25 % компаний. В этой совокупности наиболее сильные изменения значений нормированных коэффициентов в зависимости от среднегодовых темпов прироста выручки. Граница устойчивости особых точек проходит между аналогичными границами второй и третьей совокупностей моделей. Устойчивыми оказываются только особые точки моделей третьей совокупности. Интересно, что область устойчивости начинается с темпов прироста 0,09, которые близки к средней инфляции за анализируемый период. Можно считать, что компании этой совокупности с поправкой на инфляцию имеют нулевые или отрицательные темпы прироста.

Итак, перед нами три типа динамики выручки компаний, которые можно рассматривать как соответствующие разным стадиям жизненного цикла компаний при условии неизменности условий их развития. Четвертая группа компаний на графике не



показана: у нее принципиально другая модель динамики — с нулевой особой точкой. С учетом перекрытия данных в группах можно оценить, что такие компании составляют около 5 % от общего числа, их темпы прироста выручки менее 5-го перцентиля.

Данные о выручке российских компаний за период с 2009 по 2015 г. позволяют утверждать, что существует четыре типичных варианта изменения выручки компаний. Причем между этими вариантами существуют достаточно четкие границы, а сами варианты сильно отличаются между собой разным проявлением влияния текущей ситуации и предыстории. Кроме того, в каждом из вариантов по-разному проявляется зависимость между темпами прироста выручки и ее потенциалом роста.

Возвращаясь к рис. 3, можно сказать, что первая часть жизненного цикла компаний начинается с очень высоких темпов прироста выручки, порождаемых удачным рыночным решением (это самая верхняя точка на кривой), но по мере занятия рыночной ниши темпы прироста выручки падают. На графике можно выделить три этапа развития компаний, соответствующие трем совокупностям однородных моделей, рассмотренным выше. Каждый этап обозначен через средние темпы прироста выручки в 2010—2015 гг., однако для другого временного интервала цифры будут несколько отличаться, хотя качественно картина жизненного цикла будет той же. Подтверждения такого взгляда на качественную однотипность развития успешных компаний вне зависимости от временного интервала, даны в статье [15], где приведен совпадающий в деталях обобщенный портрет жизненного цикла быстрорастущих компаний, так называемых «газелей», полученный на основании данных уже с 2003 по 2015 г.

Первый этап наиболее быстрого роста характеризуется тем, что значения координат особых (неподвижных) точек (потенциальных возможностей роста) сильно зависят от значения нормированной интенсивности и темпов прироста, причем с уменьшением их значений уменьшаются и значения особых точек. Кроме того, все особые точки этой совокупности компаний неустойчивые. Исходя из особенностей значений особых точек, этот этап можно трактовать как «этап сильно изменяющихся оценок потенциала развития». Такой же этап проходят и успешные стартапы, и именно сильной зависимостью оценок потенциала роста от изменяющихся темпов прироста объясняется затруднения в оценках их истинного потенциала развития. Второй этап характеризуется тем, что по мере уменьшения темпов прироста оценки нормированной интенсивности незначительно растут, а значения особых точек уменьшаются, но не так сильно, как на первом этапе. Этот этап можно охарактеризовать как «динамика заполнения реаль-

ных рыночных ниш» или «проявление реальных возможностей роста». Третий этап характеризуется тем, что при значительном изменении нормированных интенсивностей значения особых точек меняются незначительно. Это «этап заполненных сужающихся рыночных ниш». Можно сказать, что компании этой совокупности находятся в некой «зоне застоя», которая характеризуется и малым изменением темпов прироста. Причем этот прирост меньше инфляции, фактически это деградация. Три группы компаний из этой совокупности отличаются от остальных и знаками коэффициентов регрессионных моделей: стандартизированные коэффициенты предыдущих значений становятся отрицательными. Это говорит о том, что прошлое становится для этих компаний отрицательным фактором, ухудшающим рост. Ну а за точкой «0,02» динамика выручки качественно меняется, начинается критический, четвертый этап развития — для этой совокупности моделей компаний особая точка становится нулевой. На этом этапе у компании есть два варианта дальнейшей судьбы: либо разориться, либо найти новое эффективное решение развития и вновь перейти на этап высоких темпов прироста. И многие компании, относящиеся сейчас к группам быстрого роста, успешно прошли этот этап после кризиса 2008 г. Переходы к быстрому росту благодаря удачным решениям могут происходить на любом этапе, но на четвертом этапе они необходимы для дальнейшего выживания.

Рассматривая модели динамики выручки реальных компаний, мы можем классифицировать их по принадлежности к определенному этапу развития и оценить их перспективы при допущении о неизменности условий развития.

Вполне понятно, что картину жизненного цикла для разных временных отрезков можно рассматривать только на качественном уровне. Если количественно получаемые оценки будут меняться от года к году, то на качественном уровне сценарий жизненного цикла остается неизменным даже в кризис. Зададимся вопросом: «Какой сценарий развития будет типичным для группы наиболее быстрорастущих компаний?» Попробуем увидеть его на рис. 3. Для этой группы оценки значений особых точек, которые можно трактовать как «потенциальные цели развития компаний», уменьшаются по мере уменьшения темпов прироста. Но, поскольку темпы прироста компаний этой группы неизбежно начнут уменьшаться при неизменности условий, то будут уменьшаться и значения особых точек — компании в своем развитии начнут «снижать» свои «оценки потенциальных возможностей». Этот эффект хорошо виден в табл. 2. Кроме того, начнут уменьшаться и нормированные интенсивности процессов. Это уменьшение вызовет переход рассматриваемой компании во вторую, более низ-

кую по темпам прироста совокупности — «реальных рыночных ниш». После пребывания во второй совокупности (время этого пребывания может быть разным) компания, при неизменных условиях, перейдет в «совокупность заполненных рыночных ниш». В конце концов, если менеджмент не будет ничего менять, компания попадает на траекторию, приводящую к нулю. Если ничего не изменится, то выручка компании станет стремиться к нулевой. Но ситуация, когда в компании ничего не меняется, не единственная. На любом из рассмотренных этапов компания может провести изменения в развитии, выйдя на новую рыночную нишу, которой соответствуют высокие темпы прироста выручки, что соответствует попаданию в совокупность «сильно изменяющегося потенциала развития» и процесс скольжения вниз по кривой начнется вновь.

Подобный рассмотренному выше подход можно применять и в более сложных случаях для построения альтернативных моделей регрессионного анализа другого класса. Например, воздействие ограничений может проявляться в виде влияния на рассматриваемый процесс других процессов (одним из таких процессов может быть и управляющий процесс), назовем такое отображение гибридным:

$$X_{n+1} = X_n + X_n A_{hib} (K_{hib} - \rho_{hibx} X_n - \rho_{hiby} Y_n - \rho_{hibz} Z_n - \dots),$$

где A_{hib} — интенсивность гибридного процесса, K_{hib} — ограничение процесса, $\rho_{hibx} X_n$, $\rho_{hiby} Y_n$ и $\rho_{hibz} Z_n$ — значения нескольких процессов, с соответствующими масштабирующими коэффициентами. С математической точки зрения комбинированное отображение можно рассматривать как частный случай гибридного отображения, но с позиций содержательного описания процесса и интерпретации получаемых результатов лучше их разделять.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для анализа эмпирических данных нелинейных процессов, развивающихся в условиях ограничений, предложен синтез методов регрессионного анализа и нелинейной динамики, позволяющий переходить от значений коэффициентов линейных регрессионных моделей к оценкам параметров нелинейных отображений. Это обеспечивает более глубокий анализ реальных процессов путем применения категорий нелинейной динамики. Эффективность метода показана на примере анализа данных о выручке всех российских компаний крупного и среднего бизнеса за период с 2009 по 2015 г. На основании этих данных выявлены три типичных варианта изменения выручки компаний, отличающихся влиянием текущего со-

стояния и предыстории. Это позволяет глубже понять механизмы развития компаний в зависимости от темпов прироста выручки (сильное позитивное воздействие предыстории для быстрорастущих фирм и еще более сильное, но негативное влияние предыстории для стагнирующих компаний). Также получена модель жизненного цикла компаний, позволяющая классифицировать конкретные компании по этапам развития. Перспективным представляется применение такого подхода для аналогичного анализа постоянно обновляемых новых годовых данных о компаниях; более сложных моделей нелинейной динамики; анализа разнообразных социально-экономических процессов иной природы, чем популяционная динамика компаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шрагенхайм Э. Управленческие дилеммы: Теория ограничений в действии: пер. с англ. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. — 288 с.
2. Кузнецов А.П., Савин А.В., Тюрюкина Л.В. Введение в физику нелинейных отображений. — Саратов: Научная книга, 2010. — 134 с.
3. Подлазов А.В., Полунин Ю.А., Юданов А.Ю. Статистический анализ выручки крупных и средних российских компаний: препринт № 105. — М.: Институт прикладной математики РАН, 2015.
4. *Handbook of Time Series Analysis*. — Weinheim: Wiley-VCH, 2006. — 493 p.
5. Chakrabarti B.K., Chakraborti A., Chatterjee A. (Eds.). *Econophysics and Sociophysics: Trends and Perspectives*. — Berlin: Wiley-VCH, 2006.
6. Shumway R.H.; Stoffer D.S. *Time Series Analysis and its Applications*. — Springer, 2011. — 596 p.
7. Горидько Н.П., Нижегородцев Р.М. Модели зависимости темпов инфляции от объема денежной массы: регрессионный анализ нелинейной динамики // *Экономическая наука современной России*. — 2013. — № 1 (60). — С. 39–46.
8. Kantz H., Schreiber T. *Nonlinear Time Series Analysis: 2 ed.* — Cambridge: Cambridge University Press, 2003. — 388 p.
9. Huffaker R., Bittelli M., Rosa R. *Nonlinear Time Series Analysis with R*. — Oxford University, 2017. — 384 p.
10. Milas C., Rothman P., Van Dijk D. *Nonlinear Time Series Analysis of Business Cycles*. — Emerald Group Publishing Limited, 2010. — 108 p.
11. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику: изд. 3-е, стереотипное. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 256 с.
12. Пайген Х.-О., Рихтер П. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем: пер. с англ. — М.: Мир, 1993. — 176 с.
13. Фейгенбаум М.Ж. Универсальность в поведении нелинейных систем // *Успехи физических наук*. — 1983. — Т. 141, вып. 2.
14. Кузнецов А.П., Савин А.В., Седова Ю.В., Тюрюкина Л.В. Бифуркации отображений. — Саратов: Наука, 2012. — 196 с.
15. Полунин Ю.А., Юданов А.Ю. Российские быстрорастущие компании: испытание депрессией // *Мир новой экономики*. — 2016. — № 2. — С. 103–112.

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

Полунин Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ YPlnn@yandex.ru.

Поступила в редакцию 01.11.2017, после доработки 07.11.2018.
Принята к публикации 12.12.2018.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАЦИОНАЛЬНОГО СЦЕНАРИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ В ДОЛГОСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ¹

Д.В. Трошин

На базе факторной модели предложен методический подход к комплексному учету различных факторов функционирования экономики, угроз и мер противодействия им с помощью нелинейной свертки и логистических функций. Введена функция интегральной оценки состояния экономической безопасности на временном периоде долгосрочного планирования. Эта функция предложена в качестве целевой для рационального распределения бюджетных ассигнований по мероприятиям в период планирования. Рассмотрены различные подходы к комплексованию показателей и определению предпочтений. Предложено применять аддитивную форму для функций полезности. Предложен набор целевых показателей экономической безопасности.

Ключевые слова: экономическая безопасность, фактор, показатель, комплексная функция, факторная модель, угроза, мера, предпочтение.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экономической безопасности страны представляет собой большую по размерности и сложную по своей внутренней логике задачу, актуальность решения которой в сложившейся внутренней и внешней ситуации чрезвычайно высока.

Предметом методологических исследований в области обеспечения безопасности служат выявление и описание онтологий, особенностей, устойчивых отношений между объектами, субъектами, факторами, категориями для построения когнитивных и имитационных моделей, фреймовых сетей, вынесения различных оценок в сфере взаимодействия экономической системы со средой в целях обеспечения ее безопасного существования. Такая методология предназначена для формирования основы внутренне согласованных целей, критериев, принципов, действий для выявления и прогнозирования негативных явлений, т. е. тех, которые мешают достижению целевого состояния, и рационального (в идеале оптимального) разви-

тия потенциала обеспечения безопасности и его использования для предупреждения, нейтрализации, минимизации последствий негативных явлений на траектории существования [1–6].

В настоящее время в рамках создания Федеральной системы управления рисками (далее — ФСУР) под эгидой Минэкономразвития России формируется и проходит апробацию ряд моделей для оценки и анализа состояния экономической безопасности и рисков, в частности, факторная модель, которая отражает функционирование экономики в условиях влияния угроз и рисков событий (т. е. реализаций угроз) в форме взвешенного ориентированного графа. В узлах графа расположены факторы функционирования экономики, угрозы, возможные (предполагаемые) рисковые события, меры противодействия угрозам. Строго говоря, все перечисленные категории, размещаемые в узлах графа, являются факторами, однако в целях наглядности и четкости изложения меры, угрозы, рисковые события в настоящей работе выведены из содержания категории «фактор». Ребра графа соответствуют отношениям угроз, рисков событий, факторов, мер между собой. Такая факторная модель может быть применена также для описания динамики изменения факторов во времени. Каждый фактор описывается некоторым частным по-

¹ Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках НИР за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансовому университету при Правительстве РФ.

казателем. Рассматриваемая факторная модель фактически представляет собой сеть локальных моделей парных отношений факторов, угроз, мер, а для учета влияния на некоторый узел нескольких узлов служит функция нелинейной аддитивной свертки, рассмотренная далее. Такой подход позволяет реализовать типовые универсальные процедуры оперативного построения факторной модели, ее коррекции, адаптации к конкретным ситуациям в отличие от подходов, предполагающих применение сложных трудно интерпретируемых для лица, принимающего решение (далее — ЛПР), функциональных зависимостей, включая регрессии, одного фактора от совокупности других (см., например, [7]).

Одна из основных задач в этой проблематике заключается в разработке рационального сценария обеспечения экономической безопасности, включая задачу рационального распределения ресурсов по предусмотренному комплексу мероприятий обеспечения экономической безопасности. Например, комплекс мер предусмотрен в «Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года²».

Рассматриваемый в настоящей работе методический подход к формированию оптимального сценария обеспечения экономической безопасности в долгосрочном периоде призван служить «венцом» указанной выше системы моделей и методик, который позволяет благодаря формализации и числовым оценкам конкретизировать решения и их обоснования по обеспечению экономической безопасности как в настоящее время, так и на некотором перспективном периоде времени до уровня совокупности мер и мероприятий, реализуемых в каждый единичный интервал времени (например, год).

1. ВЕРБАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве критерия оптимальности сценария обеспечения экономической безопасности целесообразно рассматривать минимум интегрированного на рассматриваемом периоде стратегического управления отклонения состояния системы от идеального (желаемого, политически заданного) состояния экономической безопасности [8] или, наоборот, максимум приближения состояния системы к идеальному. В соответствии с используемой онтологией проблематики безопасности [2], максимальная безопасность — отношение системы со средой, при котором вероятность нанесения ей значимого ущерба пренебрежимо мала. Инте-

рированное отклонение (приближение) служит целевой функцией решения рассматриваемой здесь оптимизационной задачи. Ограничениями выступают набор мер для укрепления экономической безопасности и бюджетные лимиты на каждом единичном временном интервале для реализации намеченных мер.

Состояние экономической безопасности в каждый момент времени описывается скалярной функцией экономической безопасности, определяемой в пространстве частных показателей экономической безопасности, которая в интересах описания методического подхода в дальнейшем называется «мгновенная функция ЭБ». На значения этой функции налагаются ограничения — они не должны выходить за границу допустимого состояния. Это принципиальное ограничение. За границей допустимого состояния экономическая безопасность социально-экономической системы (в данном случае страны) не обеспечена ни в какой степени. В таком состоянии при менее строгих критериях оценки система либо разрушается, либо теряет в мыслимом пространстве возможностей возможность «развернуться» и приближаться к траектории идеального существования. При более строгих критериях идентификации состояния безопасности за границей допустимого состояния система сохраняет возможность прогрессивного развития, но находится в состоянии, которое субъективно воспринимается как недопустимое, не соответствующее ни в какой степени благоприятному существованию. Выбор строгости критерия — вопрос принятия решения уполномоченным на это лицом.

Для определения целевой функции необходимо описать сравнительные предпочтения обеспечения безопасности в различной временной перспективе. Практика подготовки и принятия решений в органах обеспечения национальной безопасности свидетельствует, что рассматриваемые здесь предпочтения не равны, а убывают во временной перспективе, причем нелинейно — убывание замедляется.

В настоящее время описать убывание рассматриваемых здесь предпочтений эмпирически представляется весьма проблематичным, прежде всего, по организационным причинам: определение состава лиц, принимающих и готовящих решения в сфере экономической безопасности, механизм привлечения их к этой работе и организация исследования предпочтений указанных лиц.

В рамках настоящего исследования для практического применения предлагается описывать предпочтения к состояниям безопасности на временной оси экспоненциально убывающей функцией, которая в конце рассматриваемого периода достигает некоторого минимального значения.

² Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2017 г. № 208.



Другим способом описания рассматриваемых предпочтений может быть применение метода ПРИНН (Принятие Решений при Неустраняемой Неопределенности) [9] для отдельных рассматриваемых моментов времени при условии, что в каждую группу сравниваемых по предпочтению моментов времени входит один из рассматриваемых моментов. Применение этого метода усложняет вид функции предпочтения от времени и требует дополнительных исследований адекватности результатов реальным предпочтениям ЛПР.

Опыт эксплуатации рассматриваемых моделей в ФСУР и их применение для подготовки аналитических и руководящих документов позволит выбрать и, возможно, скорректировать наиболее адекватную модель описания рассматриваемых здесь предпочтений.

Интегрированное значение состояния экономической безопасности на рассматриваемом промежутке времени естественно представлять интегралом (или суммой значений в определенные дискретные моменты времени, например, годы) временной функции, описывающей это состояние. Такой способ интеграции совместно с ограничениями на мгновенные значения, а также убывание коэффициентов предпочтения к мгновенным значениям при движении вправо по временной оси позволяет учесть принцип справедливого отношения к «поколениям». С одной стороны, в любой момент безопасность должна быть на приемлемом уровне, а с другой, нынешнее поколение, закладывая базис для безопасности потомков, уделяет больше внимания актуальной безопасности и решению тех задач, условия решения которых в силу своей большей актуальности имеют меньше неопределенности и больше шансов получить рациональные решения. Кроме того, нынешнее поколение управленцев в решении своих актуальных задач не может рассчитывать на помощь своих преемников.

Косвенным решением проблемы противоречия между «безопасностью сегодня», «безопасностью завтра» и «безопасностью послезавтра» может служить включение в набор параметров описания состояния безопасности, т. е. частных показателей безопасности, тех, которые отражают системообразующие факторы экономики, потенциал и процесс ее развития [10]. Обеспечение благоприятных (высоких) значений таких показателей свидетельствует об укреплении устойчивости системы и ее развитии, что положительно скажется на безопасности в будущем.

Каждый частный показатель безопасности представляет собой фактическое или прогнозируемое значение в диапазоне от наихудшего (допустимого, критического, порогового) до наилучшего возможного (или требуемого).

Выбор способа расчета скалярной мгновенной функции ЭБ в пространстве частных показателей безопасности не столь очевиден, как интеграция мгновенных значений на всем рассматриваемом периоде. Существует несколько методов объединения частных показателей в скалярную функцию. Наиболее методологически проработано и логически обосновано применение функций полезности при многих предпочтениях в условиях неопределенности [11]. В зависимости от результатов исследования независимости по полезности между частными функциями может быть выбрана аддитивная или мультипликативная форма скалярной функции. По результатам исследования отношения ЛПР к риску (склонно, не склонно, безразлично, постоянное отношение на всем множестве определений частного показателя или нет) может быть выбран экспоненциальный, линейный, полиномиальный или другой вид каждой частной функции. В этом случае задача построения функций полезности существенно упрощается. Реализация подходов теории полезности, хотя и не сложна, но трудоемка.

Более простые способы предлагают рассматривать скалярную функцию в виде произведения или суммы частных функций или в виде взвешенной евклидовой метрики для оценки расстояния в пространстве показателей реального состояния от гипотетически идеального [8]. Они позволяют получить более грубые, но не трудоемкие описания. В случае нормирования значений всех показателей, частных и скалярной функций на интервале [0, 1] можно получить устойчивую (сохраняющую порядок предпочтений рассмотренных вариантов решений при включении в рассмотрение новых) скалярную функцию в виде суммы, которая также интерпретируется как сумма отклонений от желаемого состояния. Некоторые методы скаляризации, представляющие интерес для описываемой в статье задачи, рассмотрены в работе [12]. Возможно, перспективен метод, основанный на теории трудности [13, 14], однако его применение и интерпретация для оценки экономической безопасности требуют проведения дополнительных исследований. В любом случае выбор метода скаляризации не влияет на общую логику рассматриваемого в настоящей статье методического подхода, поскольку модель скаляризации включается в него как частная модель.

Для сокращения числа частных показателей, учитываемых непосредственно в скалярной мгновенной функции ЭБ, наибольшее распространение получил следующий подход. Из числа показателей выбираются наиболее важные (целевые), задающие пространство, на котором каким-либо способом определяется скалярная функция. Другие показатели должны находиться в заданных

пределах. Если какой-либо показатель не попадает в допустимую область, то значение скалярной функции приобретает наихудшее значение. Например, коэффициент текущей ликвидности предприятия должен быть больше 150 %. Если он ниже этого значения, то это угроза финансового кризиса экономики, зарождающаяся на микроэкономическом уровне. Если выше, то на макроуровне не столь важно, на сколько выше. Интерпретация этой ситуации такова: показатель, значение которого не попало в заданную область, указывает на «узкое» место, неблагоприятный фактор функционирования или развития экономики как системы, состояние которой не позволяет утверждать о достижении безопасности на каком-либо уровне. Соответствующий фактор требует приоритетного внимания. Далее будет предложено смягчение этого требования для нецелевых показателей, исходя из практических соображений.

К целевым показателям предъявляются такие требования:

— каждый из них должен непосредственно влиять на оценку экономической безопасности;

— ни один из показателей не определяет полностью оценку состояния экономической безопасности, т. е. его лучшее (худшее) значение не является достаточным условием для лучшего (худшего) значения оценки экономической безопасности;

— совокупность целевых показателей полностью определяет оценку экономической безопасности, если другие (не целевые) показатели находятся в заданных пределах; совокупность лучших (худших) значений целевых показателей является достаточным условием для лучшего (худшего) значения оценки экономической безопасности;

— целевые показатели не находятся между собой в причинно-следственных однозначно описываемых отношениях; для каждого целевого показателя не существует какое-либо непустое подмножество целевых показателей, не включающее данный показатель, совокупности значений которых однозначно определяли бы значения рассматриваемого целевого показателя.

2. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА МАКРОУРОВНЕ В СРЕДНЕСРОЧНОЙ И ДОЛГОСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВАХ

2.1. Целевая функция

Пусть $F(t)$ — состояние экономической безопасности в момент времени $t \in [t_0, T]$, где t_0 — начальный момент (например, текущий), T — конечный момент временного периода, на котором рассматривается состояние экономической безопасности; например, $T = 24$ года, т. е. четыре за-

конодательно определенных периода стратегического планирования, соответствующие двум полным политическим циклам.

В § 1 было отмечено, что для вычисления скалярной мгновенной функции ЭБ применяются подходы теории полезности³. На основе предварительного изучения можно сформулировать гипотезу, что ЛПП и лица, готовящие решения, которые будут осуществлять функционирование ФСУР «безразличны к риску» на всем множестве определения каждого частного показателя. Кроме того, частные функции независимы по полезности [11], т. е. улучшение значения одной из них не влияет на отношение к значению другой. В этом случае мгновенная скалярная функция ЭБ описывается выражением

$$F(t) = \sum_{i=1}^I k_i v_i(t), \quad (1)$$

где k_i — коэффициент важности i -го частного показателя для оценки состояния экономической безопасности, изменяющийся в пределах $[0, 1]$; $i = 1,$

$2, \dots, I$; $\sum_{i=1}^I k_i = 1$; $v_i(t)$ — нормированное значение i -го частного показателя;

$$v_i(t) = \begin{cases} \frac{V_i(t) - V_i^{\min}}{V_i^{\max} - V_i^{\min}}, & | V_i(t) \in [V_i^{\min}; V_i^{\max}], \\ 0, & | V_i(t) \leq V_i^{\min}, \\ 1, & | V_i(t) \geq V_i^{\max} \end{cases}$$

для показателя, значение которого должно расти для укрепления экономической безопасности;

$$v_i(t) = \begin{cases} \frac{V_i^{\max} - V_i(t)}{V_i^{\max} - V_i^{\min}}, & | V_i(t) \in [V_i^{\min}; V_i^{\max}], \\ 0, & | V_i(t) \geq V_i^{\max}, \\ 1, & | V_i(t) \leq V_i^{\min} \end{cases}$$

для показателя значения которого должно убывать для укрепления экономической безопасности; V_i, V_i^{\max} или V_i^{\min} — соответственно фактическое или прогнозируемое значение i -го показателя, его максимальное (максимально возможное, требуемое или

³ Отметим, что по мере накопления практического опыта эксплуатации ФСУР подход к скаляризации может быть изменен, однако это не нарушает общей логики описываемого в статье методического подхода, поскольку модель скаляризации является частной в рамках этого подхода.



максимально допустимое) и минимальное (минимально допустимое или минимально возможное, требуемое) значения.

Для вычисления коэффициентов k_i существует ряд методов. Когда их применение затруднительно по временным или ресурсным ограничениям, можно воспользоваться методом ПРИНН [9].

В случае отбора части показателей в качестве целевых формула (1) уточняется:

$$F(t) = b(t) \sum_{i=1}^{I^0} k_i v_i(t), \quad (2)$$

где показатели с номерами от 1 до I^0 — целевые (наиболее важные); индекс $b(t)$ вычисляется по формуле:

$$b(t) = \begin{cases} 1, & \prod_{i=1}^I v_i(t) > 0, \\ 0, & \prod_{i=1}^I v_i(t) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Значение I^0 целесообразно принять не более 7. Добавление некоторого восьмого показателя в случае одинаковой предпочтительности всех восьми показателей, что практически маловероятно, может в среднем уменьшить погрешность оценки только на 6,25 %. В действительности (т. е. при неодинаковой предпочтительности всех восьми показателей) оценка уточнится еще меньше.

Интегральное значение целевой функции, отражающей оценку экономической безопасности на временной перспективе от текущего года до года T , вычисляется по формуле:

$$F^T = \int_0^T \varphi(t) F(t) dt,$$

где $\varphi(t)$ — предпочтения к обеспечению экономической безопасности в t -м году, $\varphi(t) \in [0, 1]$,

$$\sum_{t=0}^T \varphi(t) = 1.$$

Для расчета коэффициентов, описывающих предпочтения ЛПР к обеспечению безопасного существования в перспективе, целесообразно принять такие исходные посылки:

— предпочтения убывают по экспоненциальному закону;

— перспектива ограничивается 24 годами (4 периода стратегического планирования, предусмотренного Федеральным законом от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации»); $t_0 = 0$, соответственно, $T = 24$.

Период выбран продолжительностью 24 года поскольку это:

— по обобщенным оценкам примерная продолжительность жизненного цикла сложного оборудования, капитальных инфраструктурных объектов без капитального ремонта;

— период разработки и создания сложных видов техники и новых базовых технологий (в том числе в рамках одного технологического уклада);

— период смены поколений людей, в том числе специалистов;

— полный цикл действующей власти (два допустимых срока), которая должна нести ответственность перед «преемниками» за передачу приемлемых для будущего условий благоприятного существования нации.

Если описывать предпочтения к обеспечению экономической безопасности в каждый момент времени t функцией $\varphi(t)$, то, исходя из принятых посылок, она рассчитывается по формуле:

$$\varphi(t) = e^{-\sigma t} / \int_0^T e^{-\sigma t} dt, \quad (4)$$

где знаменатель обеспечивает выполнение условия

$$\int_0^T \varphi(t) dt = 1,$$

а параметр

$$\sigma = -\frac{\ln(1 - d_0)}{24}.$$

Здесь $1 - d_0 = e^{-24\sigma}$ и означает минимальное значение предпочтения, которое относится к последнему рассматриваемому моменту T . Математически значение параметра $1 - d_0$ может трактоваться как погрешность, с которой функция $\varphi(t)$ приближается к оси абсцисс при значении аргумента, равном T , а по смыслу, как доля «внимания» (рабочего времени, других ресурсов), которое ЛПР тратит на рассмотрение проблем экономической безопасности, ограниченных перспективой T лет.

Если принять, что $d_0 = 0,99$, (т. е. лишь 1 % внимания ЛПР в проблеме экономической безопасности занимает перспектива за пределами 24 лет), то $\sigma = 0,1919$.

Практически состояние экономической безопасности рассматривается не как непрерывная функция на заданном временном интервале, а как функция на определенные моменты времени, отсчитываемые от текущего момента, соответственно для этих моментов рассчитываются и предпочтения. В связи с этим формула (4) приобретает вид:

$$\varphi(t) = e^{-\sigma t} / \sum_{t \in Y} e^{-\sigma t},$$

где Y — множество моментов времени, принадлежащих интервалу $[0, T]$; знаменатель, как и в формуле (4) обеспечивает равенство

$$\sum_{t \in Y} \varphi(t) = 1.$$

С учетом принятых допущений и оценки $\sigma = 0,1919$ для практических расчетов предлагается формула:

$$\varphi(t) = e^{-0,1919t} / \sum_{t \in Y} e^{-0,1919t}. \quad (5)$$

В процессе стратегического планирования целесообразно выделять значения, которые вытекают из порядка бюджетирования и практической логики планирования: $t = 0$ (актуальное значение), 1, 2, 3 (цикл бюджетного планирования, среднесрочное планирование), 6 (стратегическое планирование), 9, 12, 18 и 24 года. Для этого набора моментов оценки предпочтительности $\varphi(t)$ пересчитываются по формуле (5) и получают значения: $\varphi(0) = 0,270$, $\varphi(1) = 0,223$, $\varphi(2) = 0,184$, $\varphi(3) = 0,152$, $\varphi(6) = 0,085$, $\varphi(9) = 0,047$, $\varphi(12) = 0,027$, $\varphi(18) = 0,008$, $\varphi(24) = 0,003$.

2.2. Оценка состояния экономической безопасности и формирование сценария ее обеспечения на временном интервале («интегральная модель»)

В «интегральной» модели принята универсальная эвристическая модель взаимовлияния факторов, угроз и мер и допускается высокая степень автоматизации в рамках информационной технологии и диалоговой экспертной работы. Область применения модели определяется наличием множества разнообразных трудно формализуемых факторов и, главным образом, охватывает крупные социально-экономические системы. Во временном аспекте модель более адекватна и полезна для исследования состояний безопасности на продолжительных периодах. Такая модель применяется, как правило, не для текущих оценок в конкретных ситуациях, а для выявления складывающихся тенденций.

Для построения модели приняты допущения:

— изменение фактора, отражаемое значением соответствующего показателя, описывается логистической кривой;

— отношения между элементами факторной модели, состояния факторов (значения показателей, степени реализации мер и угроз) фиксируются (учитываются, описываются) с некоторой тактовой частотой $1/\tau$, т. е. через некоторые равные (элементарные) промежутки времени τ ; размер элементарного промежутка времени τ зависит от детализации факторной модели, природы рассматриваемых мер и детализации угроз; значения τ не всегда совпадают со значениями t , так как так-

тов для моделирования может быть несколько в течение единицы времени, принятой для оценки экономической безопасности; далее для облегчения записи и восприятия сути методического подхода будем полагать, что длина такта совпадает с длиной единичного интервала, т. е. $\tau = t$;

— воздействие нескольких факторов, угроз (рисковых событий), мер на некоторый i -й показатель описывается как сумма их «вкладов» с учетом логистического характера изменения значения показателя, описывающего состояние фактора (см. первое допущение).

Выбор логистической кривой объясняется тем, что изменение состояния фактора, как правило, зависит от множества накапливаемых микрособытий и аналогичен процессу размножения в условиях ресурсных ограничений (в данном случае объема микрособытий). Кроме того, логистическая кривая отражает часто наблюдаемое на практике явление, когда для заметного изменения какой-либо величины, например, качества ресурса или процесса, должен быть достигнут определенный порог «силы» воздействия, и, с другой стороны, когда величина приближается к максимальному значению, требуются значительные усилия, чтобы продолжать ее увеличивать. В средней части области определения величины она изменяется в зависимости от уровня воздействия линейно или близко к этому.

По мере проведения конкретных исследований и накопления опыта применения модели в рамках ФСУР конкретные пары отношений в факторной модели могут представляться специальными моделями, более адекватно описывающими эти отношения, если затраты на создание (или поиск) таких моделей оправданы по сравнению с увеличением точности оценки состояния экономической безопасности.

Принятые допущения позволяют учесть нелинейность характера влияния между элементами факторной модели и описывать его более адекватно, чем линейные аддитивные структуры или модели с импульсным описанием отношений влияния: либо влияет, т. е. переводит в некоторое определенное (допустим, лучшее) состояние или не влияет.

На основе изложенного может быть предложена математическая модель учета взаимовлияния элементов факторной модели, которая позволяет прогнозировать состояния факторов (значения показателей) в различные будущие моменты времени.

Допустим, что существует определенное множество намеченных мер $m \in \{1, M\}$ по воздействию на целевые показатели v_i .

Пусть $g_m^s(t) \in [0, 1]$ — степень реализации m -й меры в t -м году, которая функционально зависит от затраченных на реализацию ресурсов (финансовых средств) $s_m(t)$; $g_m^s(t) = g_m(s_m(t))$.



Меры имеют существенно разную природу и, соответственно, степень их реализации по-разному зависит от выделяемых ресурсов. Определение таких зависимостей выходит не только за рамки рассматриваемого здесь методического подхода, но и за рамки моделирования состояния и обеспечения экономической безопасности в рамках ФСУР. Модели таких зависимостей (практически в виде точек в пространстве «ресурсы — степень реализации») должны предоставляться для решения рассматриваемой задачи как исходные данные разработчиков конкретных мер.

Практически во многих случаях вместо функциональной зависимости используются дискретные значения степени реализации мер (варианты реализации мер, предполагающих ту или иную совокупность действий и мероприятий). Число дискретных уровней реализации для каждой меры может отличаться. Однако при большом объеме мер и факторов, на которые они должны влиять, зачастую ограничиваются четырьмя уровнями реализации мер: нулевой (отказ от меры); минимальный, позволяющий получить хоть какой-то заметный эффект; интенсивный, позволяющий решить задачу в основном; максимальный. Этим лингвистическим значениям степени реализации меры может быть сопоставлено численное значение из интервала $[0, 1]$, в общем случае разное для разных мер.

При разработке сценариев укрепления экономической безопасности под затратами на реализацию мер целесообразно рассматривать не удельные затраты на государственное управление, а специально выделяемые средства, в том числе на законодательскую, экспертную, научно-исследовательскую деятельность, недополученные бюджетные доходы вследствие введения налоговых или иных льгот, одним словом, все целевые затраты и прогнозируемые потери, связанные с реализацией намеченной меры (или их комплекса).

Для каждого m задается максимальное значение финансирования S_m , при котором мера реализуется (должна быть реализована) в полном объеме,

$$\text{т. е. } g_m^{S_m} = g_m(S_m) = 1.$$

При этом

$$\sum_{m=1}^M s_m(t) \leq S(t),$$

где $S(t)$ — ограничение на объем финансирования в t -м году сценариев обеспечения экономической безопасности.

Каждая мера не одинаково влияет на каждый фактор (показатель). Сила (степень) этого влияния описывается коэффициентом $w_{mi} \in [0, 1]$.

Мера направлена на устранение определенной совокупности угроз. Увеличение значения интересующих показателей является следствием нейтра-

лизации угроз, усиления благоприятных и ослабления неблагоприятных факторов. В связи с этим затраты на меру и сила ее воздействия не распределяются механистически по разным направлениям — по разным показателям (факторам).

Будем также полагать, что мера, влияющая на показатель максимально, позволяет достичь его максимальное значение, если реализуется полностью, т. е. верно выражение:

$$\langle g_m^S w_{mi} = 1 \rangle \Rightarrow \langle v_i = 1 \rangle.$$

В модели также приняты обозначения:

v_i^t — значение i -го показателя (фактора), полученное в момент t ;

v_j^t — значение j -го показателя, полученное в момент t ;

β_{ji} — параметр логистической кривой, определяющий влияние j -го фактора на i -й;

h_{ri} — степень реализации r -й угрозы; действие угроз учитывается аналогично мерам, только с противоположным знаком;

β_{ri} — параметр, описывающий влияние r -й угрозы на i -й фактор (показатель); параметры β_{ri} и w_{mi} аналогичны по смыслу параметру β_{ji} ;

J_i — подмножество множества J , которое составляют факторы, воздействующие на i -й, т. е. $J_i = \{j | \beta_{ji} \neq 0\}$;

M_i — подмножество множества M , которое составляют меры, воздействующие на i -й фактор, т. е. $M_i = \{m | w_{mi} \neq 0\}$;

R_i — подмножество множества R , которое составляют угрозы, воздействующие на i -й фактор, т. е. $R_i = \{r | \beta_{ri} \neq 0\}$.

Параметр β_{ji} может быть задан экспертно. В отдельных случаях можно воспользоваться аналитическими зависимостями, но их разработка, сбор и применение — предмет дальнейших междисциплинарных и междисциплинарных исследований и накопления опыта применения факторной модели в практике подготовки управленческих решений. В общем случае параметры β_{ji} могут зависеть от времени. Однако практически, если динамика изменения параметра неизвестна, то для прогнозирования будущих ситуаций используется актуальное знание, в частности, значение параметра β_{ji} .

При экспертном определении параметра β_{ji} могут быть составлены и реализованы в информационной технологии через пользовательский интерфейс соответствующие анкеты. Анкеты призваны выяснить параметр логистической кривой, описывающей изменение за один такт одного фактора под влиянием другого при отсутствии влияния со стороны иных факторов. В анкете ставится вопрос:

до какого уровня от худшего (лучшего) изменится значение i -го фактора (показателя), если на него воздействует j -й фактор, находящийся на некотором уровне (например, среднем, равном 0,5)?

Если эксперт затрудняется с ответами, то может быть применен следующий порядок действий:

1) эксперт дает ответы на поставленный выше вопрос для тех пар факторов, для которых может;

2) эксперту предлагается оценить установленные им на первом шаге степени влияния дополнительно по лингвистической шкале: очень сильное влияние, сильное влияние, среднее влияние, слабое влияние, незначительное влияние;

3) каждому значению лингвистической шкалы ставится в соответствие численное, исходя из ответов эксперта на первом шаге;

4) эксперту предлагается оценить степени влияния между парами факторов, для которых он не смог ответить на первом шаге, по лингвистической шкале;

5) лингвистическим оценкам степени влияния, полученным на шаге 4, ставятся в соответствие численные значения, полученные на шаге 3.

При наличии статистики она должна служить информационной поддержкой для оценок.

Одновременное влияние на i -й фактор других факторов, мер и угроз учитывается по формуле:

$$v_i^{t+1} = \left(\frac{2 \exp\left(\sum_{j \in J_i} v_j^t \beta_{ji} + \sum_{m \in M_i} g_m^s(t) w_{mi} - \sum_{r \in R_i} h_{ri}^t \beta_{ri}\right)}{\exp\left(\sum_{j \in J_i} v_j^t \beta_{ji} + \sum_{m \in M_i} g_m^s(t) w_{mi} - \sum_{r \in R_i} h_{ri}^t \beta_{ri}\right) + 1} + 2v_i^t - 1 \right) \frac{1}{1 + 2v_i^t}.$$

Для прогнозирования факторов (значений соответствующих показателей) на заданную временную перспективу применяется итерационная процедура. Каждая итерация соответствует одному такту. На каждом этапе процедуры рассчитываются значения всех факторов, которые становятся исходными для расчета значений на следующем такте.

Траектория состояния экономической безопасности строится с учетом динамики развертывания взаимовлияния факторов и соответствующего им изменения показателей, реализации мер и воздействия угроз.

Интегральное значение экономической безопасности на рассматриваемом временном интервале $[0, T]$ рассчитывается по формуле:

$$F^T = \sum_{t \in Y} \varphi(t) F(t). \quad (6)$$

Задача поиска оптимального сценария заключается в максимизации функции F^T путем подбора векторов $\vec{s}(t) = \|s_m(t)\|_M$ для $t \in [0; T]$ при ограничениях:

$$F^t > 0, \quad \forall t \in [0, T],$$

$$\sum_{m=1}^M s_m(t) \leq S(t),$$

$$s_m(t) \leq S_m(t), \quad \forall t \in [0, T].$$

В общем случае можно полагать, что в каждый год t может быть свой набор мер, однако практически дальше периода бюджетирования (1 год или 3 года) можно прогнозировать принятие только тех мер, которые носят долгосрочный, системообразующий характер. Остальные меры определяются на перспективу 1–3 года по складывающейся ситуации. Также невозможно достаточно достоверно спрогнозировать и бюджетные ограничения за пределами текущего периода бюджетирования.

В связи с этим решение задачи (6) сводится к поиску векторов $\vec{s}(t)$ для периода бюджетирования (1–3 года), т. е. для $t = 0$ (текущий год), $t = 1$ и $t = 2$.

Решение задачи (6) может быть получено методом нелинейной оптимизации, дискретного программирования (для дискретного задания вариантов реализации мер, что практически более правдоподобно) или имитационного моделирования. При методе дискретного программирования рассматриваемая задача может быть поставлена как целочисленная задача о ранце в ее разновидности «рюкзак с мультिवыбором» и решаться методом ветвей и границ. Предметом, укладываемым в рюкзак, здесь служит мера для каждого из рассматриваемых лет, варианты ее реализации в каждый год составляют группу предметов, из которых может быть выбран только один или не выбран вообще. Весом предмета выступают затраты на реализацию меры ($s_m(t)$). Грузоподъемность рюкзака — это суммарное ограничение на финансирование мер по обеспечению экономической безопасности ($S(t)$), а ценность — значение целевой функции (F^T).

Эффективность алгоритма ветвей и границ тем больше, чем больше отличаются между собой исходные данные: влияние мер на оценку экономической безопасности через влияния на целевые показатели, уровни реализации мер, затраты на реализацию мер.

Если применить метод ветвей и границ для большого числа мер оказывается невозможным, можно применить имитационное моделирование поиска рационального решения. В этом случае в каждом опыте осуществляется случайное распределение ресурсов между мерами. Выбирается тот вариант, который позволил получить наибольшее



значение целевой функции F^T либо за заданное время проведения моделирования, либо на множестве перебранных вариантов. В настоящее время проводятся исследования на реальной факторной модели в целях определения нижней границы области рациональных решений, удаление от которой позволяет оценить (но не вычислить) приближение рационального решения к оптимальному.

Размерность задачи может существенно сократиться, если рассматривать меры только для текущего года.

В настоящей работе набор мер принят как заданный. При более широком рассмотрении задачи разработки сценариев обеспечения экономической безопасности необходимо разрабатывать методическое обеспечение для генерации мер. Основанием здесь может служить выявление циклов в факторной модели, приводящих к эскалации негативных факторов, и, наоборот, к «затуханию» позитивных факторов, а также исследование важности как позитивных, так и негативных факторов (включая угрозы и рисковые события), вычисляемой на основе их влияния на интегральную функцию экономической безопасности.

3. ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В Стратегии обеспечения экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2017 года № 208, приведено 40 показателей для оценки состояния национальной безопасности. В работе [10] предложен перечень из 50-ти показателей, сформированный на основе методологии, реализующей витальный подход к оценке экономической безопасности. Эти перечни показателей частично пересекаются и могут дополнять друг друга. Применяя методологию витальности, можно предложить ряд показателей в качестве целевых для применения в обобщенной оценке состояния экономической безопасности:

— индекс изменения валовой добавленной стоимости — интегральная характеристика роста экономики в целом;

— уровень экспортнезависимости — интегральная характеристика устойчивости к конъюнктуре внешних рынков, недружественным действиям со стороны внешнего мира (санкциям), а также независимости от объема поступления иностранной валюты;

— уровень импортнезависимости — интегральная характеристика самодостаточности экономики для материального обеспечения удовлетворения национальных интересов;

— индекс производительности труда — интегральная характеристика процессов внедрения достижений научно-технического прогресса и создания условий для цивилизационного развития благодаря привлечению в непроемкие непроемкие сферы экономики высвобождаемой в сфере воспроизводства рабочей силы, сокращения удельного труда в непроемких сферах экономики и, в конечном итоге, для высвобождения времени жизни человека от вынужденного труда для труда творческого;

— индекс доли наукоемкой высокотехнологичной продукции в объеме общественного продукта — характеризует научно-технологическое развитие, способность экономики производить сложную продукцию, реализацию творческого потенциала экономики;

— уровень мобилизационного потенциала, который может быть вычислен как отношение максимально возможного объема производства и использования резервов ключевой продукции для жизнеобеспечения населения и воспроизводства вооружений и других общественных благ — характеризует запас прочности экономики на случай непредвиденных обстоятельств катастрофического характера, масштабной войны.

Состав целевых показателей в общем случае зависит от конкретной ситуации состояния экономики. Так, важнейшее значение для любой экономики имеет энергия, однако для России, обладающей энергетическим потенциалом, кратно превышающем потребление, нецелесообразно вводить показатель энергообеспечения в число целевых.

Для остальных показателей могут быть введены сатисфакционные критерии. В формуле (3) для вычисления коэффициента $b(t)$ задано очень жесткое условие. По результатам количественных исследований нынешнего состояния экономической безопасности [10] получается, что большая часть показателей оказывается за пределами зоны допустимых значений. В этом случае оценка экономической безопасности по формуле (2) окажется слабо чувствительной к различным вариантам комплекса мер, и будет страдать качество решения задачи (6). Для устранения этого модель можно усложнить и вычислять коэффициент $b(t)$ по формуле:

$$b(t) = \frac{1}{I} \sum_{\substack{i=1, \\ v_i > 0}}^I i.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительная особенность описанного методического подхода состоит в ориентации на учет конкретной специфики реализации угроз, отказе

от простых, обобщенных до примитивности подходов в пользу более тонких многоаспектных моделей и методик, учитывающих взаимосвязи объектов онтологии проблематики безопасности, позволяющих осуществлять прогноз, использующих глубинные особенные знания экспертов по множеству узких вопросов и, в конечном итоге, учитывать нелинейность процессов, влияющих на обеспечение безопасности, их масштабируемые и немасштабируемые результаты, учитывать вероятностную и невероятностную недетерминированности различных явлений и взаимосвязей. Такая методология ввиду необходимости оперирования большим числом исходных данных и алгоритмов их обработки предполагает применение автоматизированной информационной технологии, снабженной дружественным интерфейсом, системой управления знаниями, банком данных и знаний, библиотекой моделей, прецедентов и ситуаций, имеющей разнообразные возможности адаптации к конкретному объекту защиты, предлагающей возможность анализа и оценки состояния безопасности в режиме сценариев.

Модель, которая может быть построена на основе изложенного методического подхода, должна сопрягаться с системой мониторинга в составе Федеральной системы управления рисками, а также с системой ГАС «Управление».

В настоящей работе рассмотрено применение математической надстройки над факторной моделью для формирования рационального сценария обеспечения экономической безопасности при заданном множестве мероприятий, формирующих сценарий. Однако эта надстройка позволяет также рассчитать приоритетности воздействия на факторы в зависимости от их интегрального влияния на экономическую безопасность, в том числе опосредованно через другие факторы, а также может быть развита за счет логико-лингвистических и фреймовых сетей до инструмента поддержки творческого процесса определения мер воздействия на факторы, угрозы и др.

Важно правильно использовать скалярные и интегральные оценки — они важны не столько для оценки нынешнего состояния экономической безопасности, поскольку в этом случае служат «когнитивной тенью», заслоняя «узкие места», а как критерии для оценки долгосрочных стратегий, сценариев деятельности, выявления наиболее важных факторов и угроз.

Направление дальнейших исследований — разработка информационной технологии и отработка модели на модельных экспериментах в целях «юстировки» различных коэффициентов и параметров, проверки чувствительности к значениям различных параметров и выбору функциональных за-

висимостей, что позволит рационализировать ее аналитическую структуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багдасарян В.Э. Витальный подход к сложным социальным системам // Витальный подход к сложным социальным системам. Материалы научного семинара. — М., 2013. — С. 7—70.
2. Экономическая безопасность России: методология, стратегическое управление, системотехника: монография / под ред. С.Н. Сильвестрова. — Москва: РУСАЙНС, 2017. — 350 с.
3. Селиванов А.И., Трошин Д.В. О методологических основаниях реализации закона от 28.06.2014 № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» // Экономика. Налоги. Право. — 2015. — № 3. — С. 18—23.
4. Трошин Д.В. Парадигма существования как методологическая основа управления смыслами и потенциалами для обеспечения экономической безопасности страны / Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. Вып. 12 / ИНИОН РАН. Отд. науч. сотрудничества; отв. ред. В.И. Герасимов. — М., 2017. — Ч. 2. — С. 193—196.
5. Селиванов А.И. Субъектные основания теории и методологии экономической безопасности // Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород, 2014. — С. 249—254.
6. Сильвестров С.Н. Безопасность, обеспеченная развитием // Экономические стратегии. — 2009. — № 3. — С. 42—47.
7. Казанцев С.В. Методика и инструментарий оценки безопасности на национальном и региональном уровнях // Мир новой экономики. — 2017. — № 2. — С. 6—12.
8. Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Кушиков В.А. и др. Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности // Проблемы управления. — 2015. — № 5. — С. 37—44.
9. Пивяский С.А. Как «нумеризовать» понятие «важнее» // Онтология проектирования. — 2016. — Т. 6. — № 4 (22). — С. 414—435.
10. Трошин Д.В. Экономическая безопасность России: количественный макроанализ: монография. — М., Научные технологии, 2018. — 195 с.
11. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.
12. Трошин Д.В. Скаляризация векторных предпочтений: преодоление примитивизации // Эффективное антикризисное управление. — 2013. — № 3 (78).
13. Баева Н.Б., Куркин Е.В. Обобщение методов построения интегральных оценок качества на основе теории трудности достижения цели // Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. — 2011. — № 1. — С. 84—92.
14. Азарнова Т.В., Щепина И.Н., Леонтьев А.Н. Имитационная процессная модель выбора оптимальной стратегии управления качеством социально-экономической системы // Экономический анализ: теория и практика. — № 12. — 2016. — С. 170—186.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.

Трошин Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, ✉ giourp2@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 28.04.2018, после доработки 26. 09.2018.
Принята к публикации 17.10.2018.*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АКТИВНЫХ ПРОГНОЗОВ НА РЫНКИ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЕВРОПЕЙСКОГО РЫНКА ГАЗА

М.Ю. Шевыренко

Рассмотрена проблематика оценки влияния активных прогнозов на энергетические рынки. Представлена имитационная игровая рефлексивная модель, описывающая поведение производителей на рынке природного газа. С помощью регрессионного анализа исследовано влияние значений различных прогнозных параметров на поведение игроков на энергетическом рынке.

Ключевые слова: энергетика, прогнозирование, методы и модели прогнозирования, информационное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические прогнозы уже долгие годы находятся в центре внимания многих исследователей по всему миру, однако, несмотря на бурный рост количества таких прогнозов, они довольно редко подвергаются конструктивной критике. Подобное положение сложилось в силу ряда причин, одна из которых — отсутствие должного уровня транспарентности публикуемого прогноза, при этом бывает крайне затруднительно выявить исходные посылки его авторов. Другая причина — активность прогнозов, т. е. их способность влиять на объект прогнозирования после широкой огласки. Хорошим примером такого прогноза служит доклад «Пределы роста» [1], который пророчил довольно мрачное будущее мировой энергетике, что в сочетании с последовавшим нефтяным кризисом привело к радикальной перестройке мировых энергетических рынков.

Тем не менее, проблема влияния прогнозов на поведение рыночных игроков в энергетическом секторе экономики в средне- и долгосрочной перспективе исследована относительно слабо. Как правило, исследования, затрагивающие влияние активных прогнозов на компании в каком-либо секторе экономики, направлены на краткосрочную перспективу, т. е., по сути, на исследование изменения поведения их биржевых котировок в результате публикации прогноза (см., например, статью [2]). Хотя в подобных работах исследуются

в основном краткосрочные тренды, в ряде случаев в них рассматриваются явления, имеющие долгосрочную природу. Например, в статье [3] показано, что на российском фондовом рынке акции компаний, раскрывающих о себе информацию, гораздо более волатильны, чем акции «закрытых» компаний. Поскольку основные энергетические компании России публичные, это увеличивает риски инвестирования в их ценные бумаги. Таким образом, в долгосрочной перспективе публичные компании более уязвимы для разовых биржевых шоков.

В данной работе автор продолжает исследования влияния активных прогнозов на рыночных игроков, начатые в работах Д.А. Новикова и А.Г. Чхартишвили, например, в книге [4], применительно к рынку энергоресурсов в среднесрочной перспективе.

1. ПОДХОД К СОЗДАНИЮ МОДЕЛИ

Оценка влияния активных прогнозов на какие-либо рынки вообще представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку подчас крайне затруднительно выявить механизмы влияния подобных прогнозов на рынок и игроков, на чьи решения подобные прогнозы оказали значительное воздействие. Энергетические рынки, а особенно рынки сырья, в этом смысле выглядят достаточно привлекательно. В силу своей специфики они испытывают существенное влияние прогнозов, поскольку, опираясь в значительной степени

именно на них, инвесторы и трейдеры принимают свои решения и таким образом воздействуют на рыночные тренды.

Цель данной работы заключается в выявлении механизмов влияния активных прогнозов на рынки энергоресурсов и их применении для информационного управления рынками. Рассмотрим для примера европейский рынок газа. Данный выбор обусловлен рядом причин.

- Конкуренция за долю в европейском энергобалансе между природным газом и возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) обостряется, поскольку уже в начале 2000-х гг. ведущие энергетические компании заложили в свои стратегии инвестиции в низкоуглеродные технологии [5]. И, несмотря на посредственные текущие показатели рентабельности ВИЭ, решения об увеличении их доли в энергобалансе принимались и принимаются под сильным влиянием прогнозов [6]. Таким образом, активные прогнозы косвенно сказались на объемах спроса на газ в Европе.
- Рост экспорта сжиженного природного газа (СПГ) из США в Европу отчасти обуславливается весомыми вложениями европейских и азиатских инвесторов в американские заводы по производству СПГ [7], осуществленными под влиянием прогнозов высоких цен на газ в Европе. Следовательно, ценовые прогнозы также оказали влияние на объем и структуру предложения на европейском рынке газа.
- Значительные объемы поставок природного газа в Европу осуществляются по фьючерсным контрактам, которые весьма чувствительны к краткосрочным квартальным и месячным прогнозам газовых и нефтяных цен, а также к прогнозам объема запасов газа в хранилищах.
- Ряд событий, произошедших в последнее время, например, авария в Баумгартене [8], позволяют примерно оценить степень влияния ожиданий трейдеров на ценовую конъюнктуру в Европе.

Далее исследуется влияние активных прогнозов и информационного управления на рынки энергоресурсов на примере возможной конкурентной борьбы между американскими производителями сжиженного природного газа (СПГ) и «Газпромом» на рынке Европы. В данном случае рассматривается гипотетическая, но весьма вероятная [9] ситуация, в которой экспорт американского СПГ в Европу рентабелен.

Для исследования механизмов влияния информационного управления на характер конкуренции между указанными игроками была построена рефлексивная теоретико-игровая модель, описывающая взаимодействие этих двух рыночных игроков

и Центра¹, влияющего на их действия посредством информационного управления².

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Описываемая модель, назовем ее моделью INCOME 1 (Information Control Model), базируется на классической модели Штакельберга [10], но имеет ряд существенных отличий. Первое и основное отличие заключается в том, что модель INCOME 1 отображает ситуацию, в которой на рассматриваемом рынке есть не только две компании-игрока, производящие однородный продукт и продающие его на этом и только этом рынке, но и третий игрок — Центр, который пытается при помощи информационного управления повлиять на объемы выпуска компаний. При этом изначальные объемы выпуска компаний значительно отличаются: у одной из них — Лидера («Газпром»), она примерно в два раза выше, чем у второй — Последователя (американских компаний). Поясним, почему мы базируемся на модели Штакельберга. Для этого вначале рассмотрим некоторые ее ключевые особенности.

Как известно, главной особенностью модели Штакельберга является наличие лидирующей фирмы, или Лидера, который первым из игроков определяет свой объем выпуска товаров, а прочие игроки (Последователи) ориентируются в своих расчетах на объем выпуска Лидера. Также в этой модели, как, впрочем, и во многих других теоретических моделях, предполагается, что рассматриваемые компании производят однородный товар и поэтому их клиенты при выборе поставщика ориентируются лишь на цену товара.

Теперь рассмотрим ситуацию с рыночными игроками на газовом рынке.

Прежде всего, «Газпром» имеет мощные позиции на рассматриваемом рынке и работает на нем достаточно давно и, к тому же, обладает значительно большими текущими объемами выпуска, чем американские компании. Кроме того, американские компании только выходят на европейский рынок и по ряду причин вынуждены ориентироваться на явного лидера рынка, у которого, в отличие от них, уже давно сложились партнерские отношения во многих странах Европы. При этом

¹ Понятие «Центр» употребляется в трактовке теории рефлексивных игр [4].

² Не вызывает сомнений, что полноценная модель европейского газового рынка должна включать в себя значительно больше игроков, например, Катар или Норвегию, но в данном случае нас интересует именно аспект информационного управления, поэтому мы рассматриваем несколько упрощенную модель данного рынка.



для американского СПГ Европа пока не основной рынок, а азиатские рынки до последнего времени выглядели весьма привлекательно [11].

Таким образом, на рынке складывается ситуация, в которой явно присутствует Лидер — «Газпром» и Последователи — американские компании, например, «Cheniere», поэтому применение модели Штакельберга в качестве основы для построения модели конкуренции выглядит вполне целесообразным. Отметим, что модель INCOME 1 создана на основе модели Штакельберга, скорректированной с учетом двух важных допущений.

- Последователь конкурирует только с Лидером на рассматриваемом рынке, а Лидер конкурирует только с Последователем. В данном случае предполагается, что в силу политических причин американские компании и «Газпром» не будут конкурировать с другими игроками на рынке, например, с норвежскими или алжирскими компаниями.
- Предполагается, что спрос на газ в Европе будет расти. В данном случае автор основывается на предположении ряда исследователей [12], что доля угля в энергобалансе Европы будет снижаться в силу экологических и правовых причин, а возобновляемая энергетика не сможет достаточно быстро заместить выпадающую долю угля, и это приведет к росту спроса на газ.

Принимая во внимание график ввода в эксплуатацию новых заводов по сжижению природного газа в США и соответствующее увеличение объема американского экспорта, в данной модели нельзя ограничить представление производителей СПГ на рынке Европы одной лишь компанией «Cheniere», которая является практически единственным значимым игроком на рынке в данный момент. Тем не менее, ряд инициатив американского правительства (см., например, сообщение [13]), позволяет сделать вывод о том, что для поставок в Европу американские компании будут согласовывать свои действия. Поэтому в качестве игрока — Последователя — в данной модели будет выступать объединение всех американских игроков — экспортеров СПГ (назовем его Картелем экспортеров СПГ). В данном случае ввод одного игрока, объединяющего в себе всех американских производителей СПГ, вполне оправдан, поскольку в настоящий момент для выхода на европейский рынок американским экспортерам необходимо действовать скоординированно в силу нескольких причин.

- Для экспорта СПГ из США в Европу необходимы масштабные инвестиции в регазификационные терминалы и газораспределительные сети, которые целесообразно осуществлять при наличии достаточно большого объема СПГ, отправляемого на экспорт. Учитывая, что в насто-

ящий момент большая часть американских производителей СПГ владеет всего 1—2 заводами, а строительство новых пока является достаточно долгим и дорогостоящим процессом, для формирования на рынке высокого объема предложения целесообразнее объединить усилия, а не ввязываться в ценовую войну.

- Практически все заводы по производству СПГ сконцентрированы в одном регионе, построены примерно в одно и то же время и имеют близкие размеры и мощности, следовательно, они вполне могут иметь сопоставимые затраты на покупку и транспортировку природного газа до завода, затраты на сжижение газа и затраты на его транспортировку морем до европейских портов.
- Сложившаяся на данный момент специфическая структура торговли американским СПГ, когда сжижаемый газ перекупается у производителя неким международным трейдером, который и принимает решение о его ввозе в какую-либо страну, в ближайшем будущем может существенно измениться. Американские компании-производители СПГ ведут активную экспансию на свои рынки сбыта, строя там терминалы по регазификации СПГ. Также власти США ведут активную политику по продвижению американского СПГ в Европу [14]. Отметим, что в отличие от большинства случаев лоббирования, таким образом продвигаются интересы не одной компании, а целой отрасли или неформального картеля компаний.

Предполагается, что на протяжении всего моделируемого периода лидером рынка остается «Газпром», а Картель экспортеров СПГ будет проводить относительно осторожную политику и придерживаться позиции Последователя. Это связано с тем, что, как минимум, до 2024 г. американские компании будут иметь достаточно высокую долговую нагрузку, что вынуждает их проводить осторожную рыночную политику.

Отметим также, что в рассматриваемой модели оба игрока имеют единственный рынок сбыта — европейский. Допустим, что каждый ход в игре длится примерно один квартал. Предположим, что каждому игроку перед началом своего хода Центр сообщает значения параметров, взаимосвязанных таким образом³: $P_n(Q_n) = a_n - b_n Q_n$, где P_n — прогнозная цена газа в данный ход, \$/млн м³, a_n —

³ Взаимосвязь между ценой на природный газ и объемом его предложения представляет значительный интерес, особенно в текущий момент трансформации газовых рынков, и требует отдельного исследования. В данном случае мы исходим из предположения об их линейной взаимосвязи.

максимальная цена, по которой самый богатый покупатель может купить газ в данный ход у рассматриваемых двух игроков, b_n — коэффициент, характеризующий зависимость изменения цены от изменения объема предложения в данный ход⁴, Q_n — прогнозный совокупный объем предложения Лидера и Последователя в данный ход, а n — номер хода, $n \in \{1, \dots, N\}$.

Отметим, что игроки каждый новый ход пересчитывают параметры a_n и b_n в зависимости от новых значений P_n и Q_n . При этом значения прогнозного объема предложения Q_n для каждого хода задаются функцией $Q'(n) = Q_{n-1} K_{rs} K_{seas}$, где Q_{n-1} — значение функции Q в предыдущем периоде, K_{rs} — коэффициент, характеризующий долгосрочный рост производства газа, а K_{seas} — коэффициент, характеризующий сезонные колебания объема предложения, связанные с увеличением или снижением спроса, при этом $n \geq 1$. Для $n = 0$ $Q'(n_0) = 70\,000$ млн. м³.

Значения цены P_n для каждого хода задаются функцией $P_n = P_{n-1} K_{qc} K_{infeu}$, где P_{n-1} — значение функции P_n в предыдущем периоде, K_{qc} — коэффициент, характеризующий сезонные изменения цен на газ, а K_{infeu} — коэффициент, характеризующий квартальную инфляцию в Европе, при этом $n \geq 1$. Для $n = 0$ $P_{n0} = 304\,000$ \$/млн м³.

Исходя из особенностей производства и транспортировки трубного природного газа и СПГ «Газпромом» и Картелем экспортеров СПГ, эти игроки применяют разные бизнес-схемы [15] и имеют разные функции затрат на единицу продукции (удельных затрат).

Предположим, что функция удельных затрат «Газпрома» имеет вид $C_1(n) = (C_{1ext} + C_{1tran}) K_{infrus}$, $n \in \{1, \dots, N\}$, где C_{1ext} — затраты на добычу природного газа, C_{1tran} — затраты на транспортировку природного газа до границы ЕС, а K_{infrus} — коэффициент, характеризующий квартальную инфляцию в РФ. В данной модели предполагается, что на протяжении рассматриваемого периода налоговая система РФ и, в частности, налогообложение добычи и экспорта полезных ископаемых не изменится, поэтому доля данных налогов и пошлин включена в стоимость добычи природного газа и остается относительно стабильной. Ясно, что фор-

⁴ При этом коэффициент b_n высчитывается каждым игроком на основе предоставляемого Центром значения ценовой эластичности $\hat{\epsilon}_n$, которое является общим знанием.

мула упрощенная и в дальнейшем необходимо учитывать хотя бы налоговый компонент затрат.

Рассмотрим функцию удельных затрат Картеля экспортеров СПГ $C_2(n) = (C_{2raw} + (C_{2liq} K_{eff}) + C_{2tran}) K_{infrus} + (C_{2regas} K_{infeu})$, $n \in \{1, \dots, N\}$, где C_{2raw} — затраты на покупку трубного природного газа, C_{2liq} — затраты на сжижение и погрузку природного газа в танкер, C_{2tran} — затраты на транспортировку, C_{2regas} — затраты на регазификацию, K_{infrus} — коэффициент, характеризующий квартальную инфляцию в США, K_{eff} — коэффициент, характеризующий снижение затрат на сжижение в связи с техническим прогрессом, а K_{infeu} — коэффициент, характеризующий квартальную инфляцию в ЕС. Отметим, что цена на трубный газ в США имеет достаточно ярко выраженную сезонную волатильность. Поэтому в данной модели предполагается, что Картель экспортеров СПГ пытается минимизировать свои затраты на покупку трубного газа за счет фьючерсных контрактов, заключая соответствующие сделки с целью сгладить сезонный рост цен на газ.

Отдельно отметим, что построенная модель — рефлексивная. В рассматриваемых нами случаях игроки знают прогнозную цену на газ P_n , прогнозные объемы предложения Q_n и прогнозное значение удельных затрат конкурента UC_{in} на данный ход. Также игроки знают, кто Лидер, а кто Последователь, и думают, что они играют в игру Штакельберга, знают ее правила, и при этом предполагают, что конкурент знает их истинные затраты, однако не знают, что Центр передает другому игроку прогноз удельных затрат конкурента. Но им неизвестны удельные затраты и, соответственно, прогнозные объемы выпуска конкурента. Поэтому представления, например Лидера, относительно затрат игрока 2 в этот ход задаются функцией $RepA_1 C_{2n}(n, Q_n, UC_{2n}, P_n)$, где $RepA_1 C_{2n}$ — представление игрока 1 (Лидера) о затратах игрока 2 (Последователя) в ход n , где n — номер хода, Q_n — прогнозный совокупный объем предложения Лидера и Последователя в данный ход, UC_{2n} — значение удельных затрат конкурента, передающееся Центром игроку 1, а P_n — прогнозная цена на продукт. Аналогичным образом задаются представления для Последователя.

При этом каждый i -й игрок максимизирует свою прибыль, и ее значение можно рассчитать как функцию $Prof_n = Peq_n SupQ_n - UC_{in} SupQ_n$, где $Prof_n$ — его прибыль в момент n , $SupQ_n$ — предполагаемый равновесный выпуск i -го игрока в момент n , Peq_n — предполагаемая равновесная цена в



момент n , а UC_{in} — удельные издержки i -го игрока в момент n , при этом $i \in \{1, 2\}$.

Таким образом, в начале каждого хода Лидер и Последователь одновременно получают от Центра прогнозную информацию о состоянии рынка в этом году (значения P_n , Q_n и $RepA_iC_{jn}$). Затем они также одновременно рассчитывают значения a_n и b_n и, зная свои собственные издержки и целевые функции друг друга, максимизируют свои целевые функции, исходя из сформированных на основании данных Центра представлений о прогнозных затратах и объеме выпуска конкурента. При этом оба игрока в своих расчетах предполагают, что их конкуренту известны истинные значения их затрат. После того, как оба игрока определяют свои объемы выпуска и произведут соответствующее количество товара, на рынке сложится некоторая цена, которая становится известна обоим игрокам. Затем для каждого следующего хода указанный алгоритм повторяется. В данном случае принципиально важно, что игрок максимизирует свою прибыль в каждый ход, а не на протяжении всей игры.

С помощью данной модели были проведены несколько итераций, каждая длилась 12 ходов, т. е. прогнозный период составлял 12 кварталов. В данной серии экспериментов значения параметра UC_{1n} , характеризующего представления Последователя об удельных затратах Лидера, и параметра UC_{2n} , характеризующего представления Лидера об удельных затратах Последователя, задавались случайным образом, чтобы симитировать переменчивые оценки прогнозистов относительно будущего рынка. Предполагается, что эти случайные величины имеют дискретное равномерное распределение. Выбор данного вида распределения обосновывается тем, что, с одной стороны, мы мало знаем, чем руководствуются прогнозисты в своих рассуждениях, поэтому для нас озвучивание прогнозистом любой оценки, взятой из некоего интервала, равновероятно. С другой стороны, анализ экспертных оценок на реальном рынке показывает, что, невзирая на невозможность точного предсказания значения, которое озвучит прогнозист, мы можем с большой долей уверенности говорить о том, что оно попадет в определенный относительно небольшой интервал. В данном случае достаточно вспомнить оценки себестоимости производства и доставки в Европу американского СПГ, которые для одного и того же периода колебались в диапазоне 7–9 \$/МБТЕ (долларов США за миллион британских термических единиц), при этом оценки, не принадлежащие этому интервалу, в экспертном сообществе практически не встречались.

Так как данная модель, пусть и весьма приблизительно, но имитирует изменение поведения рыночных игроков в зависимости от различных прогнозных значений параметров рынка, полученные результаты имитационного моделирования были взяты за основу для анализа влияния прогнозов на поведение рыночных игроков.

Поскольку одним из ключевых выходных параметров модели служит объем выпуска, он был проанализирован с помощью инструментов регрессионного анализа для выявления прогнозных параметров, оказывающих на него наибольшее влияние.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В модели INCOME 1 на показатель реального суммарного объема выпуска обоих игроков $ReaQ_n$ оказывают влияние четыре параметра. В данном случае нас интересуют прогнозные значения, на которые ориентируются игроки при принятии решений:

- прогнозная цена P_n ;
- прогнозные удельные затраты Лидера UC_{1n} ;
- прогнозные удельные затраты Последователя UC_{2n} ;
- прогноз суммарного объема выпуска Q_n .

Определим уровень влияния данных параметров (объясняющих переменных) на объемы выпуска рассматриваемых игроков. Для этого воспользуемся инструментарием множественного регрессионного анализа.

Поскольку множественный регрессионный анализ применяется, когда зависимая переменная, в нашем случае суммарный объем выпуска Лидера и Последователя, связана более чем с одной независимой переменной, можно воспользоваться методом наименьших квадратов и линейной моделью множественной регрессии:

$$ReaQ_n = \beta_0 + \beta_1 P_n + \beta_2 UC_{1n} + \beta_3 UC_{2n} + \beta_4 Q_n + \varepsilon, \quad (1)$$

где β_0 — свободный член и определяет значение Q в случае, когда оставшиеся объясняющие переменные равны нулю,

$$\beta_1 = \frac{\partial ReaQ_n}{\partial P_n}, \quad \beta_2 = \frac{\partial ReaQ_n}{\partial UC_{1n}},$$

$$\beta_3 = \frac{\partial ReaQ_n}{\partial UC_{2n}}, \quad \beta_4 = \frac{\partial ReaQ_n}{\partial Q_n},$$

где ε — случайная ошибка регрессионной зависимости.

Поскольку коэффициенты β_j и свободный член β_0 — неизвестные константы, то вместо теоретического уравнения регрессии (1) необходимо оценить эмпирическое уравнение регрессии, которое можно представить в виде:

$$\text{Rea } Q'_n = \beta'_0 + \beta'_1 P_n + \beta'_2 UC_{1n} + \beta'_3 UC_{2n} + \beta'_4 Q_n + \varepsilon'$$

где $\text{Rea } Q'_n$ — приближенное к $\text{Rea } Q_n$ значение зависимой переменной, полученное при помощи уравнения регрессии, $\beta'_0, \beta'_1, \beta'_2, \beta'_3, \beta'_4$ — эмпирические коэффициенты регрессии, а ε' — значение фактической ошибки. Тогда расчетное выражение будет иметь вид:

$$\text{Rea } Q'_n = \beta'_0 + \beta'_1 P_n + \beta'_2 UC_{1n} + \beta'_3 UC_{2n} + \beta'_4 Q_n$$

Рассмотрим n экспериментов, где $n = 12$, с различными значениями объясняющих переменных и соответствующими им значениями зависимой переменной. Отметим, что число экспериментов значительно превосходит число определяемых по нему параметров и что между объясняющими переменными отсутствует строгая линейная зависимость. Методом Гаусса вычислим значения коэффициентов β'_j : $\beta'_1 = 0,13$, $\beta'_2 = 0,67$, $\beta'_3 = 0,09$, $\beta'_4 = -0,22$.

Для данной регрессии коэффициент детерминации $R^2 = 0,97$, поскольку значение критерия Фишера для рассматриваемой серии из 12 экспериментов равно 67,89, при этом p -значение = 0,000011, что существенно меньше 0,05. Это говорит о том, что объясненная дисперсия существенно больше, чем необъясненная, и модель статистически значима.

Для того чтобы определить относительную статистическую значимость каждого фактора, а, следовательно, и его важность для информационного управления, вычислим t -критерий Стьюдента для всех коэффициентов регрессии β'_j при уровне значимости 0,05: $t_{\beta'_j} = \beta'_j / m_{\beta'_j}$, где $t_{\beta'_j}$ — значение критерия Стьюдента для коэффициента β'_j , а $m_{\beta'_j}$ — стандартное отклонение оценки данного коэффициента. Сравнение полученных значений с соответствующими значениями из таблицы критических значений t -критерия для заданного числа наблюдений и уровня значимости показали, что все применяемые в модели параметры, кроме параметра UC_{2n} , по модулю больше табличного значения и, следовательно, являются статистически значимыми. Учитывая, что p -значение для пара-

метра UC_{2n} больше 0,05, его можно исключить из модели. Тогда новая модель примет вид:

$$\text{Rea } Q'_n = \beta'_0 + \beta'_1 P_n + \beta'_2 UC_{1n} + \beta'_4 Q_n$$

Для рассматриваемой регрессии коэффициент детерминации $R^2 = 0,97$, поскольку значение критерия Фишера для рассматриваемой серии из 12-ти экспериментов равно 101,25, при этом p -значение = 0,0000011, что существенно меньше 0,05. Это говорит о том, что объясненная дисперсия существенно больше, чем необъясненная, и новая модель также является значимой.

Рассмотрим значения t -критерия для параметров данной модели⁵: $t_{\beta'_1} = 9,43$, $t_{\beta'_2} = 7$, $t_{\beta'_4} = -2,9$.

Отметим, что если мы начнем исключать данные статистически значимые факторы из регрессии, то R^2 будет уменьшаться. Если после удаления одного из таких факторов значение R^2 сильно уменьшится, то это говорит о том, что статистическая значимость этого фактора весьма велика. Уменьшение значения критерия Фишера для статистической значимости всей регрессии связано с уменьшением R^2 . Поэтому можно утверждать, что удаление фактора, вызывающее наибольшее уменьшение R^2 , приводит к наибольшему уменьшению значения критерия Фишера для данной регрессии. Это, в свою очередь, говорит о наибольшей статистической значимости данного фактора для данной регрессии.

Таким образом, если мы удалим из регрессионной модели фактор с наибольшим по модулю значением $t_{\beta'_j}$, это приведет к наибольшему уменьшению R^2 по сравнению с удалением из модели любого другого фактора. Так как $|t_{\beta'_4}| < |t_{\beta'_2}| < |t_{\beta'_1}|$, можно отметить, что исключение объясняющего фактора P_n оказывает наибольшее влияние на изменение статистической значимости модели.

Полученные коэффициенты объясняющих переменных (β'_j) удовлетворяют неравенству: $|\beta'_1| < |\beta'_4| < |\beta'_2|$. Это говорит о том, что прогнозная информация о затратах Лидера, сообщенная Последователю, оказывает большее влияние на объем выпуска, чем информация о прогнозной цене или прогнозном объеме предложения.

Отметим, что такие выводы основаны на результатах имитационного моделирования, поскольку

⁵ Низкое значение t -критерия для коэффициента β'_4 дает основание для исключения его из модели, но поскольку соответствующий p -критерий меньше 0,05 и полученная при удалении параметра Q_n модель показывает снижение коэффициента детерминации, автор оставил его в модели.



Результаты регрессионного анализа имитационного моделирования

Регрессионная статистика					
Множественный R					0,987086403
R^2					0,974339567
Нормированный R^2					0,964716905
Стандартная ошибка					1880,946956
Число наблюдений					12
Дисперсионный анализ					
Наименование показателя	Степень свободы df	Сумма квадратов отклонений SS	Дисперсия MS	Критерий Фишера F	Значимость F
Регрессия	3	1 074 705 430	358 235 143,4	101,254679	0,0000011
Остаток	8	28 303 691,61	3 537 961,451	—	—
Итого	11	1 103 009 122	—	—	—
Наименование показателя	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение	Нижняя граница доверительного интервала (95 %)
Y -пересечение	-18 114,77668	5 788,693309	-3,129337782	0,014029311	-31463,52739
Переменная P_n	0,134052566	0,01421395	9,431056727	$1,31215 \cdot 10^{-5}$	0,101275139
Переменная UCI_n	0,613170157	0,087551344	7,003549298	0,00011224	0,411276395
Переменная Q_n	-0,223744053	0,076985813	-2,906302388	0,019700432	-0,401273656

ку на момент выполнения данной работы многие контракты о поставках американского СПГ на рынок Европы только начали действовать. Тем не менее, на некоторых рынках европейских стран СПГ уже присутствует в достаточном количестве. Анализ зависимости между фактическим объемом предложения на рынке газа и прогнозными значениями выпуска, цен и издержек конкурирующих поставщиков газа на примере Испании за 11 лет показал наличие взаимосвязи между изменением реального объема предложения газа на испанском рынке, прогнозной ценой газа, прогнозными объемами предложения и прогнозными затратами Лидера на этом рынке ($R^2 = 0,92$, p -значение = 0,0002). Это показывает, что в стране с высокой долей импорта СПГ весьма вероятно значительное влияние прогнозов на газовый рынок.

4. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ РАЗРАБОТОК

Тематика оценки влияния прогнозов на поведение игроков на газовом рынке представляет значительный интерес, и ее актуальность только возрастает из-за того, что в настоящее время ввиду увеличения объема производства СПГ и удешевления процесса сжижения и транспортировки газа из нескольких региональных рынков формируется глобальный рынок газа. Это снижает актуальность существующих моделей локальных региональных рынков и, к тому же, приводит к увеличению сте-

пени неопределенности относительно будущего газовой отрасли. Поэтому представления игроков о будущем рынка, сформированные под влиянием прогнозов, будут играть значительную роль при принятии управленческих и особенно инвестиционных решений относительно будущих проектов. Для описания данного процесса перспективными представляются следующие направления усовершенствования модели INCOME 1.

- Расширение области охвата модели — включение в нее, помимо европейского, азиатского и латиноамериканского рынков. Это позволит смоделировать поведение Картеля экспортеров СПГ в условиях наличия альтернативных рынков сбыта.
- Расширение списка агентов-производителей. Ввод дополнительных игроков позволит избавиться от ряда условностей, имеющихся в модели, и симитировать процесс принятия решений в условиях взаимодействия более чем двух игроков, как это обычно и происходит на реальном рынке.
- Улучшение детализации функций затрат игроков. Вполне очевидно, что в государствах, подверженных «ресурсному проклятию», налоговый компонент оказывает значительное влияние на затраты компаний [16]. Поэтому целесообразно включить данный компонент в функции затрат соответствующих игроков.
- Введение нового типа агентов-«непроизводителей»: консультантов и инвесторов. История

компания «Cheniere», производящей СПГ в США [11], показала, насколько сильно целеустремленная группа инвесторов может изменить расклад на газовом рынке за относительно небольшой срок. Распределение инвестиций между конкурирующими на глобальном рынке компаниями оказывает значительное влияние не только на принятие управленческих решений, но и на прогнозы, которые выпускают консультанты. Ввод консультантов призван сгладить текущую ситуацию на рынке, когда имеется достаточно широкое многообразие прогнозов, с которыми отчасти придется конкурировать прогнозам, выпускаемым Центром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена упрощенная имитационная игровая рефлексивная модель INCOME 1, описывающая поведение производителей на рынке природного газа Европы. Исследование влияния значений различных прогнозных параметров на поведение игроков на энергетическом рынке, проведенное по результатам имитационного моделирования, показало:

- в рыночных условиях, близких к дуополии Штакельберга, прогноз затрат Лидера рынка оказывает наибольшее влияние на изменение объема суммарного выпуска игроков из всех прогнозных параметров;
- следующим по уровню влияния на суммарный объем выпуска показателем является прогноз объема суммарного выпуска игроков;
- несмотря на распространенное мнение о наибольшей важности ценового фактора при прогнозировании, в рассматриваемой модели данный показатель меньше всего влияет на суммарный объем выпуска игроков;
- тестирование модели на фактических данных по газовому рынку Испании (крупного импортера СПГ) показало, что информация о затратах Лидера, прогноз объемов рынка и прогноз рыночных цен в значительной степени объясняют изменения объема предложения на рынке газа Испании. Также в результате данного анализа был выявлен факт существенного ослабления взаимосвязи между ценами на нефть и изменениями объема испанского рынка газа после 2008 г.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать предварительный вывод о том, что Последователь более чувствителен к информационному управлению, поскольку информация о затратах его конкурента хорошо коррелирует с динамикой объемов выпуска Последователя. Информационное управление посредством

влияния на прогнозный уровень цен на описанном рынке относительно малоэффективно, а наиболее перспективным в смысле влияния на изменение объема производимой продукции, по мнению автора, представляется информационное управление путем влияния на представления Последователя об уровне затрат Лидера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meadows D., Meadows D., Randers J., Behrens W. The Limits To Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. — N.-Y.: Universe Books, 1972. — 211 p.
2. Погожева А.А. Использование событийного анализа для оценки информационной значимости рекомендаций аналитиков по российским эмитентам // Корпоративные финансы. — 2013. — № 2 (26). — С. 36—50.
3. Чиркова Е.В., Суханова М.С. Влияние прогнозов финансовых результатов публичной компании на рыночную стоимость и волатильность ее акций на российском фондовом рынке // Корпоративные финансы. — 2013. — № 4 (28). — С. 37—52.
4. Новиков Д.А., Чхартушвили А.Г. Активный прогноз. — М.: ИПУ РАН, 2002. — 101 с.
5. Меггс Э.Дж. Долгосрочная стратегия технологического развития компании ВР // Форсайт. — 2008. — № 2. — С. 13—17.
6. Медоуз Д., Рандерс И., Медоуз Д. Пределы роста. 30 лет спустя. — М.: Академкнига, 2007. — 342 с.
7. Силантьев Ю.Б., Халюшина Т.О., Ковалева Е.Д., Кананыхина О.Г. Ресурсный газовый потенциал США // Вести газовой науки. — 2017. — № 3 (31). — С. 247—254.
8. Взрыв в Австрии оставил европейцев без российского газа. — URL: <https://lenta.ru/news/2017/12/12/gazausiano/> (дата обращения: 19.06.2018).
9. Рыков Ю.Г., Шевыренков М.Ю. Американский СПГ: экспансия начинается // Нефтегазовая вертикаль. — 2018. — № 10 (434). — С. 33—39.
10. Stackelberg H. Marktform und Gleichgewicht. — Springer: Wien and Berlin, 1934. — 134 p.
11. Сун Дж. Непотопляемый бизнес // Нефтегазовая вертикаль. — 2018. — № 9. — С. 62—66.
12. The role of natural gas in energy transition. — URL: [http://www.igu.org/sites/default/files/6 %20-%20WFES%20Decarbonisation%20160117 %20Marcel%20Kramer.pdf](http://www.igu.org/sites/default/files/6%20-%20WFES%20Decarbonisation%20160117%20Marcel%20Kramer.pdf) (дата обращения: 03.10.2018).
13. Трамп задействует СПГ как «политический инструмент» против Москвы. — URL: <https://www.rbc.ru/politics/04/07/2017/595ad63d9a7947444dc2b193> (дата обращения: 19.06.2018).
14. Yergin D. The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World. — London: Penguin, 2011. — 832 p.
15. Комлев С., Рассалов И. Спасение для американской СПГ-индустрии // Нефтегазовая вертикаль. — 2018. — № 7.
16. Росс М. Нефтяное проклятие: Как богатые запасы углеводородного сырья задают направление развития государств / пер. с англ. Ю. Каптуревского; под ред. Т. Дробышевской. — М.: Изд-во Института Гайдара, 2015. — 464 с.

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

Шевыренков Максим Юрьевич — мл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ sheverenkov@mail.ru.

Поступила в редакцию 21.06.18, после доработки 03.10.18.
Принята к публикации 17.10.18.

Z-РЕКУРРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ¹

В.А. Твердохлебов

Разработаны основные положения, модели и методы для решения задач контроля и диагностирования процессов в системе по показателям изменений связей событий в процессах. Для этого впервые классическое рекуррентное определение последовательностей расширено до Z-рекуррентного определения последовательностей, позволяющего представлять процессы формальными моделями в виде порядков Z-рекуррентных форм. Разработаны классификация порядков Z-рекуррентных форм и алгоритмы решения задач контроля и диагностирования процессов в системе с помощью представления процессов порядками Z-рекуррентных форм. Для повышения эффективности вычисления порядков Z-рекуррентных форм разработана алгебра отношений предшествования элементов, формулы которой позволяют разработать приемы вычисления порядков Z-рекуррентных форм.

Ключевые слова: задача контроля и диагностирования, сложная система, процесс, событие, последовательность, Z-рекуррентное определение, порядок Z-рекуррентной формы, алгебра предшествования элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Управление сложной человеко-машинной системой (СЧМС) предполагает решение задач контроля и диагностирования процессов различной природы — таких, как командно-информационные, действия персонала, работа техники и оборудования, обеспечение энергией и ресурсами и др. [1—3]). Для обеспечения и поддержания безопасности работы системы необходимы контроль и диагностирование протекающих в ней процессов. Общей моделью, имеющей интерпретацию в приложениях, является представление процессов последовательностями причинно-следственно связанных событий с формализацией событий как наборов значений показателей свойств событий в конкретные моменты или интервал времени. Основными направлениями в управлении системой оказываются управление событиями и управление причинно-следственными связями событий. При

управлении событиями формируются события с требующимися значениями показателей свойств, а при управлении причинно-следственными связями событий формируются и поддерживаются заданные функциональные связи значений показателей свойств между событиями, реализующие причинно-следственные связи событий (см., например, работы [4—8]). События-причины определяют аргументы для функциональных связей с значениями показателей свойств событий-следствий. В задаче контроля определяется соответствие значений показателей свойств событий и причинно-следственных связей событий с требующимися и заданными значениями показателей, а в задаче диагностирования устанавливается соответствие фактических значений показателей свойств событий и причинно-следственных связей событий конкретному дефекту события или процесса. При управлении системой выбор управляющего воздействия также связан с применением решений задач контроля и диагностирования. Пусть последовательность

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-08-01051.

$$\xi = \langle a_1, a_2, \dots, a_c \rangle, \quad c \in N^+, \quad (1)$$

представляет собой модель процесса, в котором a_1, a_2, \dots, a_c обозначают причинно-следственно связанные события. Для представления причинно-следственных связей событий функциональным отношением между элементами последовательности (1) можно воспользоваться известным рекуррентным определением последовательности рекуррентной формой F^m порядка m :

$$x_{m+1} = F^m(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (2)$$

где $1 \leq m \leq c - 1$, которому соответствует выполнение равенств

$$a_{m+1+t} = F^m(a_{1+r}, a_{2+r}, \dots, a_{m+r}), \quad 0 \leq t \leq c - m - 1. \quad (3)$$

При рекуррентном определении последовательности (1) причинно-следственные связи событий представлены равенствами (2) и (3), в которых события $a_{1+r}, a_{2+r}, \dots, a_{m+r}$ относятся к причине, а событие a_{m+1+t} к следствию. Математической моделью более полных и более глубоких по интерпретации причинно-следственных связей событий в процессах предлагается Z -рекуррентное определение последовательности (1) Z -рекуррентной формой F^M порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, $M_2 = \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}$:

$$(x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_{n_2}}) = F^M(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n_1}}),$$

где между элементами множества индексов $M_1 \cup M_2$ допускаются любые отношения, включая отношение $M_1 \cap M_2 \neq \emptyset$. Рекуррентная форма F^M порядка m является частным случаем Z -рекуррентной формы F^M порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{1, 2, \dots, m\}$, $M_2 = \{m + 1\}$. Предлагается пользоваться порядком $M = (M_1, M_2)$ Z -рекуррентной формы F^M как показателем, по которому можно определять неравенство последовательностей, и учитывать неравенства последовательностей, представляющих процессы, для решения задач контроля и диагностирования.

В задачах контроля и диагностирования событий и процессов задаются:

— множество W^* рассматриваемых и учитываемых при решении задач контроля и диагностирования процессов в СЧМС;

— множество W_0 событий и множество W_0^* , где $W_0^* \subset W^*$, процессов в работоспособной СЧМС;

— множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$ выбранных для рассмотрения дефектов событий и дефектов процессов (ошибок в командно-информационных управляющих процессах, ошибочных действий человеческих звеньев в органе управления и при реализации управляющих воздействий, неисправностей техники и оборудования и др.);

— разбиение множества W^* , из которого исключено подмножество W_0^* , на подмножества $W_{d_1}^*, W_{d_2}^*, \dots, W_{d_r}^*$ в соответствии с представлением каждого дефекта d соответствующим ему множеством W_d^* процессов с дефектом d .

Разработанный новый метод решения задач контроля и диагностирования основывается на контроле и диагностировании отдельных событий в процессах, на контроле и диагностировании причинно-следственных связей событий в процессах и контроле и диагностировании причинно-следственных связей между процессами. Структуры причинно-следственных связей являются первичными и базовыми для их замены достаточно полными и точными, математически представленными, функциональными связями между значениями показателей свойств событий и процессов [5–7]. Разнообразие процессов не позволяет ограничиться применением какого-то одного математического аппарата, и только структуры причинно-следственных связей позволяют эффективно распределять различные математические средства (дифференциальное и интегральное исчисление, аппарат формальной логики, средства порождающих грамматик, теорию графов и др.) по их применению для построения моделей событий и процессов. Системный подход представляется явным или неявным рассмотрением СЧМС как динамической системы, включая дискретные детерминированные динамические системы, т. е. как конечного автомата. Модель СЧМС может быть представлена иерархической последовательностью моделей, начинающуюся формальными комплексами причинно-следственных связей событий в процессах и процессов и заканчивающуюся достаточно полным и точным построением моделей событий и процессов.

Разработанный новый метод решения задач контроля и диагностирования процессов в СЧМС в условиях работоспособной системы и системы с дефектами предполагает выполнение следующих этапов.

Этап 1. В задачах контроля и диагностирования событий и процессов задаются множество W^* рассматриваемых и учитываемых при решении задач контроля и диагностирования процессов в СЧМС, включающее в себя множество W_0 событий и мно-



жество процессов в работоспособной СЧМС, включающее в себя множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$ выбранных для рассмотрения дефектов событий и дефектов процессов (ошибок в командно-информационных управляющих процессах, ошибочных действий человеческих звеньев в органе управления и при реализации управляющих воздействий, неисправностей техники и оборудования и др.).

Этап 2. Разбиение множества W^* , из которого исключено подмножество W_0^* , на подмножества $W_{d_1}^*, W_{d_2}^*, \dots, W_{d_r}^*$ в соответствии с представлением каждого дефекта d соответствующим ему множеством W_d^* процессов с дефектом d .

Этап 3. Набору множеств $W_0^*, W_{d_1}^*, W_{d_2}^*, \dots, W_{d_r}^*$ сопоставляются множества $\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_r$ порядков Z -рекуррентных форм в соответствии с условием: в множество $\Omega_\nu, 0 \leq \nu \leq r$, включены порядки всех Z -рекуррентных форм, которые выполняются для последовательностей из множества W_ν^* , и для набора множеств выполняются отношения $\Omega_\nu \cap \Omega_\mu = \emptyset$, где $\nu \neq \mu$ и $\nu, \mu \in \{0, 1, \dots, r\}$.

Этап 4. В задаче контроля для фактически наблюдаемой последовательности ξ' определяется множество Ω' всех порядков выполняющихся Z -рекуррентных форм. Проверяется, какое из отношений выполняется: $\Omega' \subset \Omega_0^*$ или $\Omega' \subset \bigcup_{i=1}^r \Omega_{d_i}^*$.

По выполняющемуся отношению делается вывод: «в процессах в системе нет дефекта из множества дефектов D » или «в процессах в системе имеется дефект из множества дефектов D ».

Этап 5. В задаче диагностирования для фактически наблюдаемой последовательности ξ' определяется множество Ω' всех порядков выполняющихся Z -рекуррентных форм. Проверяется, для какого конкретного множества Ω_z , где $\Omega_z \in \{\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_r\}$, выполняется отношение $\Omega' \cap \Omega_z \neq \emptyset$. Если отношение выполняется, то в процессе, определенном последовательностью ξ' , имеется дефект d_z .

Замечание 1. Задачи контроля и диагностирования решаются относительно выбранного для анализа множества дефектов D , выбранного для анализа множества событий и процессов в СЧМС. ♦

Каждая рассматриваемая последовательность $\xi \in W^*$ для решения задач контроля и диагностирования определяется множеством $\Omega\{\xi\}$ порядков Z -рекуррентных форм, определяющих последовательность ξ . Для вычисления множества $\Omega\{\xi\}$ требуется анализ множества порядков возможных Z -рекуррентных определений. Эффективность та-

кого анализа на основе перебора множества Z -рекуррентных форм ограничивается большими размерами множества. В связи с этим разработаны классификация E_1 порядков Z -рекуррентных форм, классификация E_2 образов последовательностей, исследованы связи классификаций E_1 и E_2 на основе связей между классами этих классификаций. В разработанном методе контроля и диагностирования множества порядков Z -рекуррентных форм для последовательностей определяется с помощью классификации E_2 и транслируется на классы классификации E_1 . При таком подходе сохраняется распознавание событий и распознавание процессов на основе их формальных моделей. Принципиально новое заключается в том, что в средствах контроля и диагностирования используются не сами модели событий и процессов, а математические образы таких моделей, представленные числовыми структурами, которые интерпретируются как порядки рекуррентных и Z -рекуррентных форм. Рассмотрим пример распознавания последовательностей $\xi_1 = \langle a, a, b, a, c, a, a, c, b, c \rangle$ и $\xi_2 = \langle a, a, b, a, c, a, a, b, a, c \rangle$ на основе неравенства порядков m_1 и m_2 рекуррентных форм F^{m_1} и F^{m_2} , рекуррентно определяющих последовательности ξ_1 и ξ_2 . Непосредственными вычислениями определяется, что рекуррентные формы F^{m_1} и F^{m_2} имеют вид: $x_4 = F^3(x_1, x_2, x_3)$ и $x_3 = F^2(x_1, x_2)$, где $m_1 = 3, m_2 = 2$, т. е. $m_1 \neq m_2$. Полная характеристика последовательности в представлении функциональными связями элементов дается множеством порядков Z -рекуррентных форм, определяющих последовательность, так как классическое рекуррентное определение дает только одну основную характеристику — наименьший порядок рекуррентной формы, определяющей последовательность.

Для последовательностей $\xi_3 = \langle a, a, b, a, c, a, a, c, b, c \rangle$ и $\xi_4 = \langle a, a, b, a, c, a, a, c, b, a \rangle$ соответствующие порядки m_3 и m_4 рекуррентных форм удовлетворяют отношению $m_3 = m_4 = 3$, т. е. по показателям рекуррентного определения последовательности ξ_3 и ξ_4 не различаются. Если последовательностям ξ_3 и ξ_4 сопоставлять их Z -рекуррентные определения Z -рекуррентными формами, то последовательность ξ_3 Z -рекуррентно определяется Z -рекуррентной формой F^M порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{1, 2\}, M_2 = \{5\}$, а последовательность ξ_4 Z -рекуррентной формой F^M порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{1, 2\}, M_2 = \{5\}$, Z -рекуррентно не опреде-

ляется. Действительно, для последовательности ξ_4 Z -рекуррентная форма F^M порядка $M = (\{1, 2\}, \{5\})$ не реализуется, так как ее реализацию не позволяют сделать пары парами (aa, c) и (aa, a) . Z -рекуррентная форма F^M последовательность ξ_3 Z -рекуррентно определяет, следовательно, в задачах распознавания последовательностей ξ_3 и ξ_4 формальными показателями является порядок $M = (\{1, 2\}, \{5\})$ Z -рекуррентной формы, Z -рекуррентно определяющей последовательность ξ_3 и не определяющей последовательность ξ_4 .

1. АЛГОРИТМ Z -РЕКУРРЕНТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Рассмотрим основной алгоритм для Z -рекуррентного определения последовательности. Основное логическое свойство, характеризующее Z -рекуррентное определение последовательности $\xi = \langle a_1, a_2, \dots, a_c \rangle$, $c \in N^+$, Z -рекуррентной формой F^M порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, $M_2 = \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}$ базируется на выполнении равенств

$$\begin{aligned} & (a_{j_1+t}, a_{j_2+t}, \dots, a_{j_{n_2}+t}) = \\ & = F^M(a_{i_1+t}, a_{i_2+t}, \dots, a_{i_{n_1}+t}), \\ & 0 \leq t \leq c - \max(M_1 \cup M_2), \end{aligned} \quad (4)$$

и представляется формулой

$$\begin{aligned} & ((a_{j_1+t_1}, a_{j_2+t_1}, \dots, a_{j_{n_2}+t_1}) = \\ & = (a_{j_1+t_2}, a_{j_2+t_2}, \dots, a_{j_{n_2}+t_2})) \rightarrow \\ & \rightarrow (F^M(a_{i_1+t_1}, a_{i_2+t_1}, \dots, a_{i_{n_1}+t_1}) = \\ & = F^M(a_{i_1+t_2}, a_{i_2+t_2}, \dots, a_{i_{n_1}+t_2})). \end{aligned} \quad (5)$$

(В формулах (4), (5) в последовательности ξ элементы a_v , $1 \leq v \leq c$, размещаются как элементы последовательности, т. е. с указанием их нумерации в последовательности, и затем в равенствах рассматриваются как элементы множества, т. е. без их нумерации в последовательности.)

Для решения задач контроля и диагностирования выбираются для рассмотрения множество W^* процессов в СЧМС, множество $W_0^* \subset W^*$ рассматриваемых процессов в работоспособной системе и множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_p\}$ дефектов процессов, представленных множествами $W_{d_1}^*$, $W_{d_2}^*$, ..., $W_{d_p}^*$ процессов с дефектами. Критериями для возмож-

ностей решения задач контроля и диагностирования служит выполнение отношений $W_0^* \cap W_D^* = \emptyset$ и $W_{d_v}^* \cap W_{d_\mu}^* = \emptyset$, $v \neq \mu$, $d_v, d_\mu \in D$. В предлагаемых методах решений задач контроля и диагностирования процессов моделями процессов являются порядки вида $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, $M_2 = \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}$, совмещенные для каждой анализируемой последовательности ξ в множество $E_{11}^c(\xi)$ порядков Z -рекуррентных форм, выполняющихся при Z -рекуррентном определении последовательности ξ , и в множество $E_{12}^c(\xi)$ порядков Z -рекуррентных форм, не выполняющихся при Z -рекуррентном определении последовательности ξ .

Методы решения задач контроля и диагностирования процессов, которые основываются на Z -рекуррентных определениях процессов, базируются на применении следующих алгоритмов.

Алгоритм 1 проверки для заданных последовательности ξ и порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, $M_2 = \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}$ Z -рекуррентной формы, выполняется ли Z -рекуррентное определение последовательности ξ с помощью Z -рекуррентной формы порядка M . Целевое предназначение алгоритма — определить правилами действия и порядок действий с исходными данными для проверки выполнимости Z -рекуррентного определения последовательности ξ с помощью Z -рекуррентной формы порядка M .

Этап 1. Порядок M преобразуется в набор порядков $M^1 = (M_1, \{j_1\})$, $M^2 = (M_1, \{j_2\})$, ..., $M^{n_2} = (M_1, \{j_{n_2}\})$. Для каждого порядка из этого набора порядков выполняются этапы 2—5.

Этап 2. Для порядка $M^v = (M_1, \{j_v\})$, $1 \leq v \leq n_2$, (начиная с порядка $M^1 = (M_1, \{j_1\})$) строится матрица H_v размерности $c \times c$ по правилу: элементы последовательности ξ образуют первую строку матрицы H_v , последующие строки матрицы составляют сдвиги вправо последовательности ξ на одну позицию с образованием в матрице строк $a_1, a_2, \dots, a_c; a_1, a_2, \dots, a_{c-1}; \dots; a_1$. Освободившиеся в матрице места образуют префиксы строк, представленные знаком «—».

Этап 3. Матрица H_v преобразуется в матрицу H'_v по правилу: из матрицы H_v исключаются столбцы с номерами от 1 до $(\min\{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}) - 1$ и исключаются строки с номерами, отличными от 1 и



от элементов множества M_1 . Результат полагается матрицей H'_v .

Этап 4. Для последовательности ξ , представленной отображением $\sigma_\xi: \{1, 2, \dots, c\} \xrightarrow{\text{на}} U$, и числа $m = |U|$ на множестве U вводится (произвольный) линейный порядок элементов и определяются m множеств $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m$ из столбцов матрицы H'_v по правилу: множество γ_v , $1 \leq v \leq m$, составляет все столбцы матрицы H'_v , которые начинаются одним и тем же элементом из множества U .

Этап 5. Для набора множеств $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m$ проверяется, выполняется ли отношение $\bar{\gamma}_v \cap \bar{\gamma}_\mu = \emptyset$, $1 \leq v, \mu \leq m$, $v \neq \mu$, где $\bar{\gamma}_v, \bar{\gamma}_\mu$ — столбцы, полученные из столбцов γ_v, γ_μ исключением верхнего элемента. Если отношение выполняется, то последовательность ξ определяется Z -рекуррентной формой порядка $M^v = (M_1, \{j_v\})$, $1 \leq v \leq n_2$. В случае, когда для некоторых v, μ , где $v \neq \mu$, выполняется отношение $\bar{\gamma}_v \cap \bar{\gamma}_\mu \neq \emptyset$, последовательность ξ не имеет Z -рекуррентного определения Z -рекуррентной формой порядка M^v . Последовательность ξ Z -рекуррентно определяется с помощью Z -рекуррентной формы порядка $M = (M_1, M_2)$, $M_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, $M_2 = \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}$, тогда и только тогда, когда последовательность ξ Z -рекуррентно определяется Z -рекуррентными формами всех порядков M^1, M^2, \dots, M^v .

Алгоритм 2 вычисления для последовательности ξ разбиения множества порядков Z -рекуррентных форм на подмножества выполняющихся и не выполняющихся порядков. Исходные данные: последовательность $\xi = \langle a_1, a_2, \dots, a_c \rangle$, $c \in N^+$, и классификация E_1^c порядков Z -рекуррентных форм. Целевое предназначение алгоритма 2: определить правилами действия и порядок действий для вычисления выполняющихся и не выполняющихся для последовательности ξ Z -рекуррентных определений.

Этап 1. С помощью матричной формы E_1^c классификации порядков Z -рекуррентных форм вводится линейный порядок на множестве порядков Z -рекуррентных форм.

Этап 2. С применением алгоритма 1 и учетом линейного порядка на множестве порядков Z -рекуррентных форм множество классов в классификации E_1^c разбивается на два подмножества: подмножество $E_{11}^c(\xi)$ Z -рекуррентных форм, выполня-

ющихся для последовательности ξ , и подмножество $E_{12}^c(\xi)$ Z -рекуррентных форм, не выполняющихся для последовательности ξ . Подмножества $E_{11}^c(\xi)$ и $E_{12}^c(\xi)$ используются при решении задач контроля и диагностирования процессов как значения показателя свойства функциональных зависимостей между элементами в последовательности ξ .

Алгоритм 3. Исходными данными для решения задач контроля и диагностирования служат множества A, B, C , определенные равенствами: $A = \bigcup_{\xi \in W_0^*} E_{11}^c(\xi)$ (множество порядков, представляющих варианты функционирования СЧМС в работоспособных состояниях); $B = \bigcup_{d \in D} \left(\bigcup_{\xi \in W_d} E_{11}^c(\xi) \right)$ (множество порядков, представляющих варианты функционирования СЧМС при дефектах процессов из множества дефектов D); $C = E_{11}^c(\xi')$, где ξ' — последовательность, являющаяся моделью фактического процесса, реально наблюдаемого средствами контроля и диагностирования. Множества A и B вычисляются с помощью алгоритмов 1 и 2. Целевое предназначение алгоритма 3: на основе анализа последовательности ξ' и сопоставления ей множества C получить решение задачи контроля и решение задачи диагностирования.

Этап 1. Для заданных множеств A и B и полученного множества C определить, какое из отношений имеет место: $A \cap C = \emptyset$ & $B \cap C \neq \emptyset$ или $A \cap C \neq \emptyset$ & $B \cap C = \emptyset$ (выполняющееся отношение интерпретируется как решение задачи контроля)? Если выполняется первое отношение, то процесс, представленный последовательностью ξ' , не содержит дефектов из множества дефектов D . Если выполняется второе отношение, то процесс, представленный последовательностью ξ' , содержит дефекты из множества дефектов D .

Этап 2. Для решения задачи диагностирования рассматривается отношение: $C \cap E_{11}^c(\xi) \neq \emptyset$ & $C \cap E_{11}^c(\xi'') = \emptyset$, где $\xi \in D$ и $\xi'' \in D$ & $\xi'' \neq \xi$ (выполняющееся отношение интерпретируется как решение задачи диагностирования с логическим выводом «в процессе, представленном последовательностью ξ' и множеством C порядков, выполняющихся для ξ' Z -рекуррентных форм, имеется дефект, определенный последовательностью ξ »).

Как было уже отмечено, решение задач контроля и диагностирования является не абсолютным, а относительным, базирующимся на использовании множеств A, B и C . Алгоритм 3 сформулирован для случая множеств вида $E_{11}^c(\xi)$ порядков Z -рекуррентных форм, выполняющихся для последова-

тельности ξ . По принятой классификации порядков Z -рекуррентных форм множество $E_{11}^c(\xi)$ однозначно определяет множество $E_{12}^c(\xi)$ порядков Z -рекуррентных форм, не выполняющихся для последовательности ξ . Это означает, что в алгоритмах 1—3 вместо множеств вида $E_{11}^c(\xi)$ могут меняться множества вида $E_{12}^c(\xi)$.

Пример 1. Для последовательности $\xi = \langle a, a, b, d, a, b, b, d, a, d, d \rangle$ и порядков Z -рекуррентных форм $M^1 = (\{1, 2\}, \{4, 6\})$ и $M^2 = (\{1, 2\}, \{5\})$ рассмотрим применение алгоритма проверки, определяется ли последовательность ξ Z -рекуррентными формами F^{M^1} и F^{M^2} . На первом шаге алгоритма для порядка M^1 строится матрица H_1 . На втором шаге алгоритма матрица H_1 преобразуется в матрицу H_2 в результате исключения столбцов 1, 2, 3 и строк 7, 8, 9, 10:

$$H_1 = \begin{pmatrix} a, a, b, d, a, b, b, d, a, d, d \\ - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - - - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \\ - - - - - - - - - - a, a, b, d, a, b, b, d, a, d \end{pmatrix},$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} d, a, b, b, d, a, d, d \\ b, d, a, b, b, d, a, d \\ a, b, d, a, b, b, d, a \\ a, a, b, d, a, b, b, d \\ - a, a, b, d, a, b, b \\ - - a, a, b, d, a, b \end{pmatrix}.$$

Следующий, третий шаг алгоритма, предназначен для обеспечения исходными данными декомпозиции порядка M^1 на два порядка: $M^{11} = (\{1, 2\}, \{4\})$ и $M^{12} = (\{1, 2\}, \{6\})$. Применяя эту декомпозицию порядка, проверим выполнимость Z -рекуррентных определений последовательности ξ с помощью Z -рекуррентных форм $F^{M^{11}}$ и $F^{M^{12}}$. (Если последовательность Z -рекуррентно определяется Z -рекуррентными формами порядков $(\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_1\})$, $(\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_2\})$, ..., $(\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_{n_1}\})$, то последовательность Z -рекуррентно определяется Z -рекуррентной формой порядка $(\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_1, j_2, \dots, j_{n_1}\})$. Из матрицы H_2 извлекаются матрицы H_{21} и H_{22} , требующиеся для проверки выполнимости Z -рекуррентных определений Z -рекуррентными формами $F^{M^{11}}$ и $F^{M^{12}}$. Для этого по формуле $r = c - \max(|M_1 \cup M_2|) + 1$, где $c = 11$,

$M_1 = \{1, 2\}$ и $M_2 = \{4, 6\}$, определяется число подпоследовательностей последовательности ξ , которое требуется рассмотреть при Z -рекуррентных определениях: $r = 6$. Для построения матрицы H_{21} из матрицы H_2 исключаются строки 2, 5, 6 и столбцы 7, 8, а для построения матрицы H_{22} исключаются строки 2, 3, 4 и столбцы 1, 2. Матрицы H_{21} и H_{22} имеют вид:

$$H_{21} = \begin{pmatrix} d, a, b, b, d, a \\ a, b, d, a, b, b \\ a, a, b, d, a, b \end{pmatrix}, \quad H_{22} = \begin{pmatrix} b, b, d, a, d, d \\ a, b, d, a, b, b \\ a, a, b, d, a, b \end{pmatrix}.$$

По определению Z -рекуррентные формы $F^{M^{11}}$ и $F^{M^{12}}$ Z -рекуррентно определяют последовательность ξ , если в каждом столбце матриц H_{21} и H_{22} представлена функциональная зависимость элементов верхних строк матриц от соответствующих элементов нижних частей столбцов. В рассматриваемом случае Z -рекуррентные формы $F^{M^{11}}$ и $F^{M^{12}}$ не определяют последовательность ξ , так как в матрице H_{21} представлены не функциональные связи элементов $(a, b) \rightarrow a$ и $(a, b) \rightarrow d$, а в матрице H_{22} представлены не функциональные связи элементов $(a, b) \rightarrow b$ и $(a, b) \rightarrow d$. Следовательно, одним из признаков последовательности ξ является невыполнение для последовательности ξ Z -рекуррентного определения с помощью Z -рекуррентной формы порядка $M^1 = (\{1, 2\}, \{4, 6\})$. Если для последовательности $\xi_1 = \langle a, a, b, d, a, b, b, d, a, d, b \rangle$ и порядка $M^3 = (\{1, 2\}, \{5\})$ Z -рекуррентной формы F^{M^3} построить матрицу H_3 , аналогично построению матриц H_{21} и H_{22} , то получаем, что матрицей H_3 представлены функциональные связи, определяемые порядком M^3 :

$$H_3 = \begin{pmatrix} a, b, b, d, a, d, b \\ b, d, a, b, b, d, a \\ a, a, b, d, a, b, b \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} a, b \rightarrow a, & a, b \rightarrow a, \\ a, d \rightarrow b, & b, d \rightarrow d, \\ b, a \rightarrow b, & b, a \rightarrow b, \\ & d, b \rightarrow d. \end{matrix}$$

2. КЛАССИФИКАЦИИ ПОРЯДКОВ Z -РЕКУРРЕНТНЫХ ФОРМ

Для последовательностей фиксированной длины $c \in N^+$ классификация порядков Z -рекуррентных форм является частью классификации для последовательностей большей длины. В общем случае классификации систематизированы в последовательность классификаций $\Omega_1^1, \Omega_1^2, \dots, \Omega_1^c, \dots$. Порядок $M = (M_1, M_2)$, где $M_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, $M_2 = \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\}$, построен из элементов множества $C = \{1, 2, \dots, c\}$ как выбор из множества C двух подмножеств M_1 и M_2 . Для любого c определим



последовательность возможных значений M_1 на основе упорядочивания сочетаний элементов из множества S по одному, по два, ..., по c . Для M_1 каждое конкретное сочетание из S по $n = 1, 2, 3, \dots, c - 1$ элементов упорядочим в соответствии с естественным порядком чисел и предположением, что $M_1 \in \{\{1\}, \{1, 2\}, \dots, \{1, c - 1\}, \{1, 2, 3\}, \{1, 2, 4\}, \dots, \{1, 2, \dots, c - 1\}\}$. Последовательность возможных значений M_2 определим аналогично с ограничением условием, что в элементах множества M_2 не содержится 1. Из двух последовательностей возможных значений M_1 и M_2 построим классификацию в форме такой таблицы, в которой в заглавном столбце расположены возможные значения множества M_1 , а в заглавной строке — возможные значения множества M_2 . На пересечении столбцов для множества M_1 и строк для множества M_2 в таблице размещаются показатели порядка $M = (M_1, M_2)$ Z -рекуррентной формы. С использованием классификации порядков Z -рекуррентных форм систематизируется построение числовых характеристик.

Пример 2. Примером классификации порядков Z -рекуррентных форм для последовательностей длины $c = 5$ являются 210 порядков, которые расположены как элементы в таблице с первым столбцом $\{\{1\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 4\}, \{1, 5\}, \{1, 2, 3\}, \{1, 2, 4\}, \{1, 2, 5\}, \{1, 3, 4\}, \{1, 3, 5\}, \{1, 4, 5\}, \{1, 2, 3, 4\}, \{1, 2, 3, 5\}, \{1, 2, 4, 5\}, \{1, 3, 4, 5\}\}$ и с первой строкой $\{\{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{2, 3\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}, \{4, 5\}, \{2, 3, 4\}, \{2, 3, 5\}, \{2, 4, 5\}, \{3, 4, 5\}\}$. Например, порядок $M = (M_1, M_2) = (\{1, 3\}, \{4\})$ Z -рекуррентной формы в таблице, соответствующий рассматриваемому Z -рекуррентному определению последовательности, расположен на пересечении строки 3 и столбца 3.

3. АЛГЕБРА ОТНОШЕНИЙ ПРЕДШЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОТНОШЕНИЙ ПРЕДШЕСТВОВАНИЯ

Для получения теоретических результатов требуется развитие Z -рекуррентных определений последовательностей на более общей алгебраической основе, позволяющей обобщенное представление последовательности. Пусть последовательность $\xi = \langle a_1, a_2, \dots, a_c \rangle$, $c \in N^+$, построена из элементов множества W_ξ , т. е. ξ определяется отображением $\varphi_\xi: \{1, 2, \dots, c\} \xrightarrow{B} W_\xi$. Различные последовательности имеют различные взаиморасположения элементов. Для того чтобы распознавать последовательности на алгебраической основе, введем для всех сравниваемых последовательностей отношения предшествования « \prec » элементов в соответствии с также вводимым линейным порядком на

множестве W_ξ . На основании этого каждой анализируемой последовательности сопоставляется фундаментальная структура, в которой представлены не элементы, а их выполняющиеся или не выполняющиеся отношения предшествования. Если отношение предшествования « \prec », введенное на множестве W_ξ , на каких-то позициях не выполняется, то это будем обозначать знаком « \succ ». Повторы элементов в последовательности требуют употребления знака « $=$ ». Множество знаков $\{=, \prec, \succ\}$ полагаем алгебраическим множеством в алгебре отношений предшествования

$$\Theta = (\{=, \prec, \succ\}; \{\cdot, \cup, \{\dots\}^*\}),$$

где « \cdot » — операция конкатенации (умножения, сцепления последовательностей), « \cup » — теоретико-множественное объединение, « $\{\dots\}^*$ » — операция ограниченной итерации, т. е. итерации с исключением пустой последовательности.

Пример 3. Последовательностям $\xi_1 = \langle a, a, b, c, d, h \rangle$ и $\xi_2 = \langle b, b, c, d, e, u \rangle$ относительно линейного порядка a, b, c, d, e, h, u соответствует одна и та же формула алгебры отношений предшествования $\langle =, \prec, \prec, \prec, \prec \rangle$. Это означает, что по показателю Z -рекуррентного порядка $M = (M_1, M_2) = (\{1, 2\}, \{3\})$ последовательности ξ_1 и ξ_2 не различаются. Вычислительная эффективность использования замены последовательностей соответствующими им формулами алгебры отношений предшествования возрастает при увеличении длины сравниваемых последовательностей.

Для того чтобы определять порядки Z -рекуррентных форм в Z -рекуррентных определениях последовательностей, введем классификацию формул алгебры отношений предшествования.

Рассмотрим классификацию формул алгебры отношений предшествования.

Базовые классы в классификации Ω_2 : $K_1 = \{=\}^*$; $K_2 = \{\prec\}^*$; $K_3 = \{\succ\}^*$; $K_4 = \{=\}^* \cdot \{\prec\}^*$; $K_5 = \{=\}^* \cdot \{\succ\}^*$; $K_6 = \{\prec\}^* \cdot \{=\}^*$; $K_7 = \{\succ\}^* \cdot \{=\}^*$; $K_8 = \{\prec\}^* \cdot \{\succ\}^*$; $K_9 = \{\succ\}^* \cdot \{\prec\}^*$.

Основными производными от базовых классов являются классы: $K_{10} = \{=\}^* \cdot \{\prec\}^* \cdot \{=\}^*$; $K_{11} = \{=\}^* \cdot \{\succ\}^* \cdot \{=\}^*$; $K_{12} = \{\prec\}^* \cdot \{=\}^* \cdot \{\prec\}^*$; $K_{13} = \{\succ\}^* \cdot \{=\}^* \cdot \{\succ\}^*$; $K_{14} = \{\prec\}^* \cdot \{=\}^* \cdot \{\succ\}^*$; $K_{15} = \{\succ\}^* \cdot \{=\}^* \cdot \{\prec\}^*$; $K_{16} = \{=\}^* \cdot \{\prec\}^* \cdot \{\succ\}^*$; $K_{17} = \{=\}^* \cdot \{\succ\}^* \cdot \{\prec\}^*$; $K_{18} = \{\prec\}^* \cdot \{\succ\}^* \cdot \{=\}^*$; $K_{19} = \{\succ\}^* \cdot \{\prec\}^* \cdot \{=\}^*$.

Классы K_1, K_2, \dots, K_{19} не имеют пересечений, и принадлежность последовательности к конкретному классу определяется достаточно просто. Существуют структуры функциональных связей элементов, которые принадлежат классу $K_0 = \{=, \prec, \succ\}^*$, но не принадлежат введенным классам K_1, K_2, \dots, K_{19} . Например, продолжение классификации содержит классы $K_{20} = \{=, \prec, =, \prec\}^*$ и $K_{21} = \{=, \succ, =, \succ\}^*$, которые содержат последовательности с легко проверяемыми порядками Z -рекуррент-

ных определений. Любая последовательность из классов K_{20}, K_{21} Z -рекуррентно определяется Z -рекуррентной формой порядка $M = (M_1, M_2) = (\{1\}, \{2\})$. Классы K_1, K_2, \dots, K_{21} соответствуют начальной части классификации.

4. СВОЙСТВА ЛОГИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ФОРМУЛ АЛГЕБРЫ ОТНОШЕНИЙ ПРЕДШЕСТВОВАНИЯ С Z -РЕКУРРЕНТНЫМИ ОПРЕДЕЛЕНИЯМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Рассмотренная классификация разработана с целью ее применения для эффективного вычисления соответствующих последовательностям порядков Z -рекуррентных форм, по которым распознаются последовательности. Примерами такого применения служат следующие утверждения.

Утверждение 1. Если последовательность η принадлежит любому из классов $K_1, K_2, K_3, K_6, K_7, K_{20}, K_{21}$, то последовательность η определяется Z -рекуррентной формой F^M , где $M = (M_1, M_2) = (\{1\}, \{2\})$.

Утверждение 2. Если последовательность η принадлежит любому из классов K_8, K_9 , то последовательность η определяется Z -рекуррентной формой F^M , где $M = (M_1, M_2) = (\{1, 2\}, \{3\})$.

Утверждение 3. Если последовательность η принадлежит любому из классов K_{10}, K_{11} , классу $\{=\}^* \cdot \{<\}^* \cdot \{=\}^*$ и префикс последовательности η , состоящий только из последовательности равенств, имеет длину k , то последовательность η определяется Z -рекуррентной формой F^M , где $M = (M_1, M_2) = (\{1, 2, \dots, k\}, \{k+1\})$. ♦

На основе утверждений 1—3 и аналогичных им утверждений эффективно вычисляются числовые показатели порядков Z -рекуррентных форм, характеризующих последовательность, т. е. формула алгебры отношения предшествования в ряде случаев определяет порядки Z -рекуррентных форм проще, чем это можно сделать непосредственной проверкой, выполняется ли для последовательностей Z -рекуррентная форма рассматриваемого порядка.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИМЕНЕНИЯ Z -РЕКУРРЕНТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

При интерпретации формул алгебры отношений предшествования как моделей Z -рекуррентных определений последовательностей для последовательности $\xi = \langle a_1, a_2, \dots, a_c \rangle$, $c \in \mathbb{N}^+$, в соответствующем последовательности отображении $\varphi_\xi: \{1, 2, \dots, c\} \xrightarrow{\text{на}} W_\xi$ на множестве W_ξ вводится линейный порядок $\psi_\xi: \{1, 2, \dots, n\} \xrightarrow{\text{на}} W_\xi$, где $n = |W_\xi|$.

Отображения φ_ξ и ψ_ξ различаются тем, что в последовательности, определяемой отображением ψ_ξ , не содержится повторов элементов, а в последовательности ξ такого ограничения нет. Если элемент $a \in W_\xi$ имеет k вхождений $a_{v_1}, a_{v_2}, \dots, a_{v_k}$ в последовательность ξ , то индексы v_1, v_2, \dots, v_k интерпретируются как номера мест элемента a в последовательности ξ . При классическом рекуррентном определении последовательности ξ с помощью рекуррентной формы F^m порядка m каждому варианту a_{v_μ} , $1 \leq \mu \leq k$, вхождения элемента a сопоставляется непосредственно предшествующая подпоследовательность длины m , однозначно определяющая элемент a . Для некоторых вхождений однозначное определение элемента a возможно с помощью непосредственно предшествующей подпоследовательности меньшей длины или предшествующей подпоследовательности с исключенными из подпоследовательности элементами. Z -рекуррентное определение предназначено для:

— представления функциональных связей элементов в последовательности более полной и глубокой числовой структурой (множеством порядков Z -рекуррентных форм, выполняющихся при Z -рекуррентном определении последовательностей);

— исключения в подпоследовательности предшествующих элементов лишних, не требующихся для однозначности определения, элементов;

— исключения условия обязательного предшествования элементов последовательности, относящихся к аргументам, элементам, которые определяются аргументами.

Введение Z -рекуррентных определений последовательностей ориентируется на решение задач контроля и диагностирования процессов, представленных последовательностями событий, и на систематизированное представление информации о структурах функциональных связей элементов в последовательностях. При построении различных вариантов математических моделей СЧМС наблюдаемые или теоретически определенные процессы существенно характеризуются функциональными зависимостями между событиями в процессах. При этом построенные по наблюдениям последовательности событий не всегда представляются в последовательностях в соответствии с условием предшествования причины следствию во времени, что учтено в Z -рекуррентных определениях последовательностей. Задачи контроля и диагностирования в управлении решаются для проверки работоспособности, обнаружения и идентификации дефектов в функционировании СЧМС, а также для использования контрольной и диагностической информации при выборе управляющего воз-



действия. Предполагается, что аппарат Z -рекуррентного определения последовательностей применяется на базе предварительных построений моделей процессов в системе, на основе использования компактных и заранее вычисленных значений показателей процессов. В реальном масштабе времени числовые характеристики процессов в форме наборов показателей порядков Z -рекуррентных форм определяются только для фактического, анализируемого процесса.

Задачи контроля и диагностирования при управлении в момент t (в интервале Δt) решаются, прежде всего, с целью проверки работоспособности системы и идентификации дефектов в процессах, а также для обеспечения органа и средств управления дополнительной информацией. Принципиальная невозможность полностью заменить СЧМС формальной моделью и, главное, в конкретный момент времени определить соответствие СЧМС ее модели по всем показателям модели приводит к не устранимой неопределенности. В управлении СЧМС, в которой имеются дефекты и нарушения в процессах, значение контроля и диагностирования процессов возрастает, в частности, возрастают требования к решению задач контроля и диагностирования в реальном масштабе времени. Компактные числовые показатели порядков Z -рекуррентных форм, определяющих процессы и которые во всех случаях, кроме одного фактического процесса, можно вычислять заранее до реального управления и размещать часть правил управления вне СЧМС. Предполагается, что в взаиморасположении элементов в последовательности представлены для событий группы причин, группы следствий и их причинно-следственные связи.

Для того чтобы применять математический аппарат, требуется причинно-следственные связи событий перевести в функциональные зависимости между значениями показателей свойств событий. Эту первоначальную задачу предлагается решать на основе Z -рекуррентных определений последовательностей.

Задача 1 построения функциональных зависимостей между значениями показателей свойств событий в процессах.

Заданы: набор свойств R_1, R_2, \dots, R_k , по которым характеризуются события; набор множеств U_1, U_2, \dots, U_k значений показателей свойств; последовательность $\xi = \langle a_1, a_2, \dots, a_c \rangle$, $c \in N^+$, для которой каждому элементу a_v , $1 \leq v \leq c$, сопоставлен вектор $h(a_v) = (a_{v1}, a_{v2}, \dots, a_{vk})$, где $a_{v\mu}$, $1 \leq \mu \leq k$; значение свойства R_μ в событии a_v .

Требуется определить функциональные зависимости между значениями показателей свойств со-

бытий в процессе, представленном последовательностью ξ .

Метод решения задачи 1. В соответствии с классификацией порядков Z -рекуррентных форм для последовательностей длины c , применяя алгоритм Z -рекуррентного определения последовательностей, вычисляются для последовательности ξ подмножества Ω_ξ^+ (выполняющихся для последовательности ξ порядков Z -рекуррентных форм) и Ω_ξ^- (не выполняющихся для последовательности ξ порядков Z -рекуррентных форм) множества Ω_c . Если порядок $M = (\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\})$ принадлежит подмножеству Ω_ξ^+ , то по порядку M определяется n_2 функциональных зависимостей $f_1^\xi, f_2^\xi, \dots, f_{n_2}^\xi$ между значениями показателей свойств событий. Функция f_ω^ξ , $1 \leq \omega \leq n$, определяется множеством равенств $a_{j_\omega+t} = f_\omega^\xi(a_{i_1+t}, a_{i_2+t}, \dots, a_{i_{n_1}+t})$, где значения t соответствуют вхождению элементов $a_{i_1+t}, a_{i_2+t}, \dots, a_{i_{n_1}+t}, a_{j_\omega+t}$ в последовательность ξ для проверки выполнимости Z -рекуррентного порядка $M^0 = (\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_\omega\}, \{j_\omega\})$.

Функциональные зависимости $f_1^\xi, f_2^\xi, \dots, f_{n_2}^\xi$ между значениями показателей свойств событий определяют базу для выбора математического аппарата, представляющего функции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи контроля и диагностирования реальных СЧМС не имеют абсолютных решений, ставятся и решаются относительно выбранного множества вариантов функционирования в работоспособном состоянии СЧМС и при множестве D неисправностей в технике и оборудовании, ошибок в командно-информационных управляющих процессах, при неправильных действиях человеческих звеньев в управлении и др. В данной работе предполагается, что в моделях процессов, т. е. в последовательностях, взаиморасположение элементов представляет причинно-следственные связи событий. Это предположение переносится на Z -рекуррентные определения последовательностей: в порядках Z -рекуррентных форм предполагаются определенными причинно-следственные связи событий через функциональные зависимости элементов. В Z -рекуррентных определениях зависимости между элементами обобщены до функциональных зависимостей между местами

для элементов в последовательности. Порядок $M = (\{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}, \{j_1, j_2, \dots, j_{n_2}\})$ Z -рекуррентной формы F^M характеризует последовательность ξ как последовательность, в которой события, расположенные в ней на местах $i_1 + t, i_2 + t, \dots, i_{n_1} + t$, однозначно определяют события, расположенные на местах $j_1 + t, j_2 + t, \dots, j_{n_2} + t$ (значения t определяются в соответствии с длиной последовательности ξ и порядком M). Множество порядков Z -рекуррентных форм, выполняющихся для последовательности ξ , используется как единственная характеристика процесса по модели в виде последовательности ξ , но может использоваться как часть информации о событии и процессе для управления СЧМС. Существенное свойство Z -рекуррентного определения последовательности состоит в том, что при таком определении представляются связи событий, а не изолированные события.

Таким образом, для постановок и решений задач контроля и диагностирования процессов в сложных человеко-машинных системах разработаны основные положения, модели и методы, принципиально расширено классическое рекуррентное определение последовательностей на основе введенного Z -рекуррентного определения последовательностей. Для последовательностей, представляющих причинно-следственные связи событий, предлагается использовать полную характеристику функциональных связей между элементами последовательности, что возможно при сопоставлении последовательности всех вариантов порядков Z -рекуррентных форм, выполняющихся для последовательности. Введена классификация порядков Z -рекуррентных форм и разработаны алгоритмы, реализующие Z -рекуррентные определения. Разработана алгебра отношений предшествования элементов в последовательности, позволяющая эф-

фективно проверять Z -рекуррентные определения последовательности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твердохлебов В.А. Геометрическая форма автоматных отображений, рекуррентное и Z -рекуррентное определение последовательностей // Изв. Саратовского ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. — 2016. — Т. 16, вып. 2. — С. 232–241.
2. Твердохлебов В.А. Z -рекуррентное определение последовательностей в задачах контроля и диагностирования процессов в системах // Доклады академии военных наук. — 2016. — № 2 (70). — С. 43–47.
3. Твердохлебов В.А. Управление потоками состояний крупномасштабных систем // Материалы Восьмой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015» / ИПУ РАН. — М., 2015. — С. 333–335.
4. Алешкин А.П., Архипова И.Г., Полиенко В.Н. и др. Метод рекуррентного оценивания параметров движения подводного объекта по данным космических навигационных определений буксируемой аппаратуры потребителя // Радиопромышленность. — 2018. — № 1. — С. 57–61.
5. Умирзаков И.Х. Рекуррентный метод определения различных наборов кластеров и распределения кластеров по размерам в системе с конечным числом частиц // Бултеровские сообщения. — 2015. — Т. 44, № 10. — С. 45–63.
6. Брега Г.В. Рекуррентный подход к управлению рисками в инновационной деятельности // Управленческие науки. — 2015. — № 2. — С. 50–57.
7. Анцев Г.В., Лысенко Л.Н., Петров В.А. Повышение точности определения параметров орбит на основе применения операторов совмещения витковых оценок по результатам малоинтервальной обработки данных ГЛОНАСС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. — 2016. — № 5 (110). — С. 99–110.
8. Daum F. Nonlinear Filters: Beyond the Kalman Filter // IEEE Aerospace and Electronic Syst. — 2005. — Vol. 8. — P. 57–71.

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

Твердохлебов Владимир Александрович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, ✉ tverdokhlebovva@list.ru.

Поступила в редакцию 03.07.2018, после доработки 30.10.2018.
Принята к публикации 12.11.2018.

Новая книга

Салтыков С.А., Русяева Е.Ю. *Подходы к определению приоритетов в науке и инновациях.* — М.: ИПУ РАН, 2018. — 150 с.

Представлены подходы к определению приоритетности научных исследований и инноваций. Предложен экспертно-наукометрический подход к оценке приоритетности научных коллективов, который соединяет в себе достоинства экспертного и формального подходов. Приоритетность тем научных исследований на различные периоды упреждения определяется с помощью типологии уровней готовности научных исследований, позволившей сформулировать подходы к устранению разомкнутости инновационного цикла. Для различения приоритетности научных тематик различного «размера» предложена типология структурных уровней научного знания, на каждом из которых вопрос о приоритетности ставится по-разному. Для идентификации междисциплинарных тем научных исследований разработана типология междисциплинарности. В качестве примера процедуры определения тематической приоритетности выполнено исследование, показывающее взаимную приоритетность исследований по блокчейну как виду распределенного реестра, приоритетного в цифровой экономике, и работам по теории игр с несовершенной информацией.

Для специалистов в области науковедения, методологии науки, студентов и аспирантов соответствующих специальностей, работников Министерства науки и высшего образования РФ, лиц, интересующихся вопросами организации научных исследований.

Рецензенты: д-р техн. наук Ю.В. Сидельников, д-р экон. наук С.И. Черных.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ¹

В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов

Предложен принцип организации многоуровневой ситуационной модели управления сложными технологическими процессами в недоопределенных условиях окружающей среды. Разработаны инструментальные средства представления и обработки технологических знаний, полученных экспертным путем, и накопленного опыта управления, базирующиеся на применении аппарата нечетких множеств, позволяющего обобщить представление эталонных ситуаций и на этой основе снизить число применяемых в ситуационной модели управления решающих правил. Определены основные условия, обеспечивающие возможность оперативного сравнения эталонных и проблемных ситуаций и выбора на этой основе результативных управлений.

Ключевые слова: технологический процесс, технологическое оборудование, многоуровневая модель, ситуационное управление, эталонная ситуация, проблемная ситуация, лингвистические переменные и функции.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных и сложных проблем управления производственной деятельностью в нестабильной окружающей среде (ОС) заключается в эффективном управлении как отдельными технологическими цепочками (ТЦ), так и организованным на их основе сложным технологическим процессом (ТП) производства, например, машиностроительной продукции, который, как правило, характеризуется большим числом технико-экономических показателей $Q = \{q_{i_1}\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$, определяющих его текущее состояние или технологический режим функционирования.

Отметим, что в настоящее время большое внимание уделяется в основном решению проблем нижнего уровня управления ТП в нестабильной ОС. Например, в работах [1–4] предложены методы эффективного управления технологическим оборудованием и указаны перспективы их развития на основе построения аналитической модели процессов его функционирования. В работах [5, 6] рассмотрены принципы интеллектуализации уп-

равления технологическим оборудованием для случаев, когда невозможно построить аналитические модели функционирования ТП. В этой связи особое значение приобретает подготовка высококвалифицированных технологов-операторов по управлению ТП в различных отраслях промышленного производства. В настоящее время ввиду высокой сложности объекта для управления ТП применяются автоматизированные системы, ведущую роль в которых играет высококвалифицированный оператор-технолог, на которого ложится основная нагрузка, связанная с принятием управленческих решений. Следовательно, к одной из основных проблем, ограничивающих сегодня широкое внедрение и эксплуатацию АСУТП на отечественных производственных предприятиях, следует отнести высокие требования к квалификации специалистов, способных распознать и проанализировать возникающие на объекте управления проблемные ситуации и на этой основе принять эффективные управленческие решения [7–9]. К одной из попыток обойти указанную проблему можно отнести применение в АСУТП экспертных советующих систем, позволяющих выдать технологу-оператору рекомендации, связанные с принятием решений в различных нестандартных проблемных ситуациях, возникающих на объекте управления [10, 11]. Однако и в этом случае прерогатива выбора оконча-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-29-12839 офи_м.

тельного наиболее эффективного решения остается за высококвалифицированным оператором-технологом.

В настоящей работе предлагается один из подходов, позволяющий обойти отмеченную выше проблему на основе реализации функций диспетчерского управления интеллектуальной автоматической системой принятия решений.

В общем случае сложный ТП представляет собой кортеж $\langle \text{ТЦ}_1, \text{ТЦ}_2, \dots, \text{ТЦ}_j, \dots, \text{ТЦ}_m \rangle$, состоящий из m технологических цепочек ТЦ_j , каждая из которых определяется упорядоченной последовательностью выполняемых в ней технологических операций $O_j = \{o_{i_2}^j\}$, $i_2 = \overline{1, n_2^j}$ связанных с реализацией определенного этапа изготовления заданных изделий. Каждая i_2 -я технологическая операция ТЦ_j реализуется на соответствующем ей технологическом оборудовании ($\text{ТО}_{i_2}^j$), например, токарном станке с ЧПУ, работающем по заданной программе функционирования ($\text{ПФ}_{i_2}^j$), определяющей, например, длину и число проходов режущего инструмента, а также толщину съема металла за один проход.

В общем виде технологические цепочки ТЦ_j , входящие в структуру сложного технологического процесса, можно представить в формате: $\text{ТЦ}_j = \langle \text{Вх}_j \rangle \langle P_j \rangle \langle \text{Вых}_j \rangle$, где $\langle \text{Вх}_j \rangle$ — вход ТЦ_j , который определяется, например, числом различного вида покупных изделий и заготовок, необходимых для производства, запланированного на выходе $\langle \text{Вых}_j \rangle$ объема производимой продукции требуемого качества; P_j — тело ТЦ_j , которое задается следующей четверкой $P_j = (\text{ТМ}_j, \text{ТО}_{i_2}^j, \text{ПФ}_{i_2}^j, Q_j)$, где ТМ_j — технологический маршрут или упорядоченное множество технологических операций, из которых складывается ТЦ_j ; Q_j — множество параметров состояния ТЦ_j .

Таким образом, для сбалансированного функционирования сложного ТП необходимо чтобы выполнялись следующие основные условия:

— показатели, определяющие состояние каждого выхода $\langle \text{Вых}_j \rangle$, $j = \overline{1, m_j - 1}$ предыдущей ТЦ_j , должны биективно соответствовать показателям состояния каждого входа $\langle \text{Вх}_j \rangle$, $j = \overline{2, m_j}$ следующей ТЦ_{j+1} ;

— сроки преобразования входа $\langle \text{Вх}_j \rangle$ в выход $\langle \text{Вых}_j \rangle$, т. е. сроки реализации отдельных ТЦ_j , входящих в структуру ТП, должны быть скоординированными между собой. Это достигается путем

подбора производительности и количества единиц технологического оборудования для каждой входящей в структуру ТП технологической операции.

Следовательно, задача организации ТП сводится к сбалансированию входящих в него технологических цепочек, а задача управления определяется регулированием процесса преобразования входа $\langle \text{Вх}_1 \rangle \text{ТЦ}_1$ в выход $\langle \text{Вых}_m \rangle \text{ТЦ}_m$ при случайно действующих в ОС возмущающих факторах $d_{i_3} \in D$,

$i_3 = \overline{1, n_3}$, например, выход из строя технологического оборудования, различной степени износ режущего инструмента, нарушение технологических режимов и возникновение брака, несвоевременная поставка заготовок и т. д. Данную задачу целесообразно разбить на следующие подзадачи.

1. Управление технологическими режимами выполнения отдельных операций $o_{i_2}^j \in O_j$ в каждой j -й технологической цепочке, входящей в структуру ТП при заданных целях, определяемых множеством требуемых значений показателей их состояния, исходя из установленных программ функционирования $\text{ПФ}_{i_2}^j$ соответствующего им технологического оборудования $\text{ТО}_{i_2}^j$.

2. Управление отдельными технологическими цепочками ТЦ_j , входящими в структуру ТП, при случайно действующих в ОС возмущающих факторах $d_{i_3} \in D$ с учетом заданных значений параметров их состояния Q_j .

3. Управление процессом программирования оборудования и реализации ТП в целом.

Учитывая большую размерность сформулированной задачи и связанные с этим проблемы [12], в работе для ее решения предлагается использовать многоуровневую модель ситуационного управления с нечеткой логикой представления и обработки знаний, полученных экспертным путем [13, 14]. При этом оценка текущего состояния ТП осуществляется на основе данных, поступающих от интеллектуальной системы контроля режимов его функционирования [15].

Первый уровень (нижний) данной модели предназначен для контроля и управления состоянием каждой отдельной технологической операции $o_{i_2}^j \in O_j$, входящей в структуру ТЦ_j . Задача ситуационного управления в этом случае сводится либо к автоматической смене технологических режимов работы, например, станков с ЧПУ, когда на вход ТЦ_j поступают заготовки для механической обработки, имеющие отклонения в размерах от заготовок предыдущей партии, либо к выбору метода управления, обеспечивающего требуемую точность



обработки заготовок, когда, например, произошел неполный износ режущего инструмента и др.

Второй уровень служит для контроля и управления либо процессом сбалансирования технологических режимов функционирования отдельных ТЦ_р, образующих ТП когда, например, выходит из строя технологическое оборудование, либо, когда возникает необходимость в смене параметров реализации для нескольких входящих в них взаимосвязанных между собой технологических операций.

Третий уровень предназначен для автоматического перепрограммирования оборудования, контроля и управления состоянием ТП в целом. Например, когда нарушены технологические режимы функционирования нескольких ТЦ_р, требующих одновременного устранения отклонений показателей их состояния от заданных значений в реальном времени при взаимном влиянии технологических цепочек друг на друга.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Сформулируем основные проблемы, которые необходимо решить в процессе построения многоуровневой модели ситуационного управления сложным ТП. В общем случае в основе организации ситуационной модели управления лежит гипотеза о том, что на основе полученных экспертным путем технологических данных, а также накопленного передового опыта управления можно сформировать множество полных ситуаций $S^* = \{s_{i_4}^*\}$, $i_4 = \overline{1, n_4}$ и поставить в соответствие каждой из них эффективное управление $u_{i_5} \in U$, $U = \{u_{i_5}\}$, $i_5 = \overline{1, n_5}$ [16], позволяющее обеспечить требуемое текущее состояние ТП. При этом каждая полная ситуация включает в себя описание текущего состояния ТП ситуационной системы управления и ОС.

Под эффективным управлением $u_{i_5} \in U$, как правило, следует понимать такое управление, которое позволяет выполнить необходимые для достижения требуемых режимов функционирования ТП преобразования проблемных текущих ситуаций $S = \{s_{i_6}\}$, $i_6 = \overline{1, n_6}$ на объекте управления (ОУ). Например, при непредвиденном изменении требуемого режима функционирования технологического оборудования. В общем случае каждая такая текущая проблемная ситуация $s_{i_6} \in S$ формальным образом представляется в виде мультиграфа $G_{i_6} = (V_{i_6}, E_{i_6})$, часть вершин которого V_{i_6}

помечается отклонениями фактических значений параметров состояния ОУ $q_{i_1} \in Q$ от заданных их значений $q_{i_1}^* \in Q$, а другая часть вершин определяется влияющими на них возмущающими факторами $d_{i_3} \in D$ ОС. В свою очередь множество ребер

E_{i_6} графа G_{i_6} также разбивается на два подмножества. Элементы одного из них помечаются отношениями между смежными вершинами, которые определяют характер взаимного влияния отклонений одного параметра состояния на другой. Элементы другого подмножества представляют собой отношения, которые характеризуют влияние возмущающих факторов ОС на отклонения параметров состояния отдельного технологического оборудования, ТЦ_р и ТП в целом.

Отметим, что в качестве ОУ в соответствии с уровнем иерархии принятия решений в ситуационной модели управления рассматриваются: отдельные единицы технологического оборудования и реализуемые на нем технологические операции, различные ТЦ_р, входящие в структуру ТП и непосредственно сам технологический процесс в целом.

Целенаправленное преобразование текущих проблемных ситуаций на ОУ осуществляется путем отработки управлений $u_{i_5} \in U$, позволяющих получить такое его состояние, в котором все контролируемые параметры принимают необходимые на текущий момент времени значения согласно реализуемой программе обработки деталей. Это обеспечивается на основе управления процессом реализации ТП, направленного на компенсацию влияния всех действующих в ОС возмущающих факторов $d_{i_3} \in D$. Другими словами, ситуационное управление должно обеспечивать работу всех единиц технологического оборудования ТП в заданных на текущий момент времени режимах функционирования с целью реализации технологических операций, связанных с преобразованием входа $\langle Vx_1 \rangle$ первой ТЦ₁ в выход $\langle Vых_m \rangle$ последней ТЦ_м, входящей в структуру ТП.

Практика показывает, что, как правило, мощность множества заданных управлений U меньше мощности множества полных ситуаций S^* [16]. В этой связи множество S^* для построения модели ситуационного управления разбивается на классы аналогичных друг другу ситуаций $S_K = \{s_{j_2}^K\}$, $j_2 = \overline{1, m_2}$, такие, что все возникающие в ТП текущие ситуации можно отнести к одному из полученных таким образом классов полных ситуаций. При этом для каждого класса $S_K \subset S$ разбиения множества ситуаций на объекте управления опре-

деляется такое управление $u_{i_5} \in U$, которое позволяет во всех текущих ситуациях, относящихся к этому классу S_K , провести их эффективное преобразование в смысле достижения требуемого на текущий момент времени состояния ТП.

Отметим, что вместо описанного выше классического разбиения полных ситуаций S^* на классы SK целесообразно обобщить технологические знания, используемые в многоуровневой модели ситуационного управления для принятия решений и выбора результативных управлений. Это позволит сократить объем информации, хранящейся в базе знаний ситуационной системы управления, и благодаря этому повысить оперативность принимаемых решений. С этой целью для каждого класса разбиения $S_K \in S$ полных ситуаций формируется обобщенное описание входящих в него проблемных ситуаций в виде эталонной ситуации $S_K \in S_{\mathcal{S}}$, где $S_{\mathcal{S}}$ — множество эталонных ситуаций.

При этом множество эталонных ситуаций $S_{\mathcal{S}}$ в многоуровневой модели ситуационного управления будет состоять из подмножеств $S_{\mathcal{S}} = S_{\mathcal{S}}(o_{i_2}^j) \cup S_{\mathcal{S}}(\text{ТЦ}_j) \cup S_{\mathcal{S}}(\text{ТП})$, где $S_{\mathcal{S}}(o_{i_2}^j)$ — подмножество эталонных ситуаций, используемых для выбора управлений на уровне реализации отдельных технологических операций ТП; $S_{\mathcal{S}}(\text{ТЦ}_j)$ — подмножество эталонных ситуаций, позволяющих организовать выбор управлений на уровне управления j -ми технологическими цепочками, входящими в структуру ТП; $S_{\mathcal{S}}(\text{ТП})$ — подмножество эталонных ситуаций, используемых для выбора управлений на уровне регулирования текущего состояния ТП в целом.

Для обобщенного описания и сравнения между собой эталонных и текущих проблемных ситуаций на ОУ в процессе выбора управлений для представления входящих в них параметров и отношений целесообразно воспользоваться терминами соответствующих им лингвистических переменных (ЛП) [17]. В этом случае каждая нечетко заданная эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{S}}$ должна представлять собой обобщенное описание множества нечетко представленных, аналогичных друг другу, проблемных ситуаций $s_{i_6} \in S$ на ОУ. Другими словами, каждая эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{S}}$ должна быть сформирована таким образом, чтобы относящееся к ней управление $u_{i_5} \in U$ было результативным во всех проблемных ситуациях $s_{i_6} \in S$ на ОУ, для которых она является обобщением.

Таким образом, основная проблема разработки эффективной модели ситуационного управления сводится к получению, обработке и структуризации

полученных экспертным путем технологических знаний, а также накопленного передового опыта управления ТП с целью формирования для каждого его уровня множества логико-трансформационных правил вывода, имеющих следующий формат описания.

1. Для уровня управления отдельными технологическими операциями $o_{i_2}^j \in O$ и реализующим эти операции технологическим оборудованием $\text{ТО}_{i_2}^j$ строятся логико-трансформационные правила вывода:

$$s_K(o_{i_2}^j) \in S_{\mathcal{S}}(o_{i_2}^j): s_{i_6}(o_{i_2}^j) \oplus u_{i_5}(o_{i_2}^j) \rightarrow s_{i_6}^*(o_{i_2}^j).$$

Эта запись означает, что если в процессе выполнения операции $o_{i_2}^j$ сложилась текущая проблемная ситуация $s_{i_6}(o_{i_2}^j)$, для которой обобщением является эталонная ситуация $s_K(o_{i_2}^j)$, предусматривающая отработку (обозначена знаком \oplus) управления $u_{i_5}(o_{i_2}^j)$, то реализация этого управления на ОУ приводит к преобразованию ситуации $s_{i_6}(o_{i_2}^j)$ в текущую ситуацию $s_{i_6}^*(o_{i_2}^j)$, которая определяет требуемый режим функционирования технологического оборудования, реализующего данную операцию.

2. На уровне управления отдельными технологическими цепочками ТЦ_j , входящими в структуру ТП, применяются следующие логико-трансформационные правила вывода:

$$s_K(\text{ТЦ}_j) \in S_{\mathcal{S}}(\text{ТЦ}_j): s_{i_6}(\text{ТЦ}_j) \oplus u_{i_5}(\text{ТЦ}_j) \rightarrow s_{i_6}^*(\text{ТЦ}_j).$$

Такого вида правила показывают, что если в процессе реализации технологической цепочки ТЦ_j возникла текущая проблемная ситуация $s_{i_6}(\text{ТЦ}_j)$, а эталонная ситуация $s_K(\text{ТЦ}_j)$ является ее обобщением, предусматривающим необходимость отработки управления $u_{i_5}(\text{ТЦ}_j)$, то реализация этого управления на ОУ приводит к преобразованию ситуации $s_{i_6}(\text{ТЦ}_j)$ в ситуацию $s_{i_6}^*(\text{ТЦ}_j)$, которая определяет требуемое на данный момент времени состояние технологической цепочки.

3. На уровне управления процессом реализации ТП в целом формируются логико-трансформационные правила выбора управлений вида:

$$s_K(\text{ТП}) \in S_{\mathcal{S}}(\text{ТП}): s_{i_6}(\text{ТП}) \oplus u_{i_5}(\text{ТП}) \rightarrow s_{i_6}^*(\text{ТП}).$$

Эта запись означает, что если в процессе реализации ТП возникает проблемная ситуация $s_{i_6}(\text{ТП})$,



а эталонная ситуация s_k (ТП) является ее обобщением и допускает отработку управления u_{i_5} (ТП), то реализация данного управления на ОУ приводит к преобразованию ситуации s_{i_6} (ТП) в требуемую на данный момент времени текущую ситуацию $s_{i_6}^*$ (ТП).

Следовательно, согласно назначению различных уровней ситуационного управления ТП каждая проблемная ситуация на первом его уровне определяется отклонениями фактического режима от заданного режима функционирования отдельного технологического оборудования и связанными с ними отклонениями параметров реализуемых технологических операций. Проблемные ситуации второго уровня ситуационного управления ТП включают в себя отклонения от заданных режимов функционирования нескольких единиц технологического оборудования, относящихся к одной и той же ТЦ_j при их взаимном влиянии друг на друга. И, наконец, проблемные ситуации третьего уровня ситуационного управления определяются одновременно возникающими в нескольких ТЦ_j нарушениями режимов функционирования или необходимостью переналадки технологического оборудования.

Отметим, что на основе приведенных выше логико-трансформационных правил вывода фактически реализуется пропорциональный закон регулирования параметров состояния $q_{i_1} \in Q$ технологического оборудования ТП. В случае же, когда требуется более высокая точность регулирования отдельных параметров состояния ТП, т. е. необходимо устранить остающееся недопустимое отклонение $\Delta q_{i_1}^*$ после реализации на основе ситуационного управления пропорционального закона регулирования, управление $u_{i_5}^* \in U$ доопределяется, например, на основе функциональной зависимости:

$$u_{i_5}^* = f_{i_7}(\Delta q_{i_1}^*, d_{i_3}), \quad (1)$$

где $\Delta q_{i_1}^*$ — отклонение текущего значения параметра состояния ТП $q_{i_1} \in Q$ от требуемого значения, $d_{i_3} \in D$ — действующий на параметр $q_{i_1} \in Q$ состояния возмущающий фактор ОС.

Аналитическую форму функциональной зависимости (1) можно получить в виде эмпирической модели $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$ на основе построения соответствующей ей лингвистической функции (ЛФ) [18], где a_1, a_2 — коэффициенты, определяемые методом регрессионного анализа [19] на основе обработки знаний, полученных экспертным путем.

2. ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЗНАНИЙ В МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Как уже отмечалось, к одному из эффективных способов получения обобщенного описания различных эталонных ситуаций в многоуровневой модели ситуационного управления ТП следует отнести применение математического аппарата нечетких множеств. Основу прикладного применения аппарата нечетких множеств составляют ЛП и ЛФ, позволяющие формализовать и обобщить знания экспертов (высококвалифицированных технологов и обслуживающего ТП технического персонала) на основе языка их представления, близкого к естественному языку, с целью организации автоматического принятия решений в процессе реализации функций диспетчерского управления.

Применение ЛП для представления и обобщения знаний позволяет представить различные отклонения параметров состояния в проблемных ситуациях на различных уровнях ситуационного управления в виде пар: $\langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$, где T_{j_3} — терм ЛП с названием «Отклонение параметра q_{i_1} », в интервал численных значений которого попадает отклонение Δq_{i_1} параметра $q_{i_1} \in Q$ в текущем состоянии ТП; $\mu(\Delta q_{i_1})$ — степень принадлежности отклонения Δq_{i_1} к нечеткому множеству, определяющему терм ЛП T_{j_3} .

После оценки наблюдаемого на ОУ отклонения Δq_{i_1} показателя состояния $q_{i_1} \in Q$ с целью его представления в виде пары $\langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$, вначале определяется соответствующий ему терм T_{j_3} на основе следующего правила, позволяющего установить подинтервал численного значения базовой шкалы ЛП, в который оно попадает:

$$\Delta q_{i_1} \rightarrow \begin{cases} T_1, & \text{если } 0 \leq \Delta q_{i_1} < x_1^*, \\ \dots \\ T_{j_3}, & \text{если } x_{j_3-1}^* \leq \Delta q_{i_1} < x_{j_3}^*, \\ \dots \\ T_5, & \text{если } x_4^* \leq \Delta q_{i_1} \leq x_5^*, \end{cases}$$

где $x_{j_3-1}^*$ и $x_{j_3}^*$ — соответственно нижняя и верхняя граница числовых значений термина T_{j_3} .

Затем вычисляется степень принадлежности $\mu(\Delta q_{i_1})$ количественного значения или базовой пе-

ременной отклонения Δq_{i_1} интервалу $[x_{j_3-1}^*, x_{j_3}^*]$ численных значений терма T_{j_3} [20]: $\mu(\Delta q_{i_1}) = 1 - \Delta q_{i_1}/x_{j_3}^*$.

Пусть отклонения параметра состояния ТП $q_{i_1} \in Q$ в эталонной и проблемной ситуациях соответственно определяются парами $\Delta q_{i_1} = \langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$ и $\Delta q_{i_1}^* = \langle T_{j_3}^*, \mu(\Delta q_{i_1}^*) \rangle$. Тогда степень $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*)$ их нечеткого равенства между собой можно оценить согласно правилу:

$\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 1$, если выполняется условие

$$(|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)| \leq \mu_0) \otimes (T_{j_3} = T_{j_3}^*);$$

иначе $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = \mu(\Delta q_{i_1}) \Leftrightarrow \mu(\Delta q_{i_1}^*)$,

если выполняется условие

$$(|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)| > \mu_0) \otimes (T_{j_3} = T_{j_3}^*);$$

иначе $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 0$,

если выполняется условие $T_{j_3} \neq T_{j_3}^*$,

где $|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)|$ — абсолютная величина разности; \Leftrightarrow — операция нечеткой эквивалентности [11]: $\min(\max(\mu(\Delta q_{i_1}), 1 - \mu(\Delta q_{i_1}^*)), \max(\mu(\Delta q_{i_1}^*), 1 - \mu(\Delta q_{i_1})))$; μ_0 — допустимая погрешность сравнения; \otimes — операция, означающая необходимость одновременного выполнения правой и левой части проверяемого условия.

Приведенное выше правило сравнения позволяет установить, что сравниваемые на его основе отклонения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ равны между собой, т. е. $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 1$, когда оба отклонения попадают в заданную окрестность μ_0 одной и той же точки на базовой шкале значений, соответствующей им ЛП. Отклонения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ нечетко равны между собой при условии, что $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) > h$, т. е. степень их нечеткого равенства принимает значение больше заданного порога h , и они попадают в интервал численных значений одного и того же терма. Как правило, для выполнения условия нечеткого равенства сравниваемых величин порог сравнения h согласно требованиям операции нечеткой эквивалентности принимается равным не менее 0,5 [11]. Наконец, сравниваемые значения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ отклонения не равны между собой, когда степень их нечеткого равенства либо принимает значение, равное нулю, т. е. они попадают в интервалы численных значений различных термов, либо $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) \leq h$. Отметим, что чем больше порог h ,

тем выше точность сравнения нечетко заданных параметров состояния ОУ.

Основной недостаток приведенной оценки состоит в том, что получаемые в результате сравнения степени нечеткого равенства одноименных отклонений могут оказаться некорректными или не удовлетворяющими аксиомам метрики [21]. Это проявляется в том случае, когда сравниваемые значения одноименного отклонения попадают по разные стороны от центра тяжести функции принадлежности, что может привести к выполнению условия $(|\mu(\Delta q_{i_1}) - \mu(\Delta q_{i_1}^*)| = 0) \otimes (T_{j_3} = T_{j_3}^*)$ при разнесенных их значениях на базовой шкале.

Обойти указанный недостаток можно, дополнив рассмотренное выше правило сравнения нечетко заданных значений отклонения подправилом, которое применяется в случае, когда сравниваемые значения одноименного отклонения расположены по разные стороны от центра тяжести функции принадлежности нечеткого множества, в интервал численных значений которого они попадают:

$$\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) = 1 - \frac{|\Delta q_{i_1} - \Delta q_{i_1}^*|}{x_{j_3-1}^* - x_{j_3}^*},$$

если $T_{j_3} = T_{j_3}^*$. (2)

Единица в оценке (2) позволяет обеспечить ей выполнение всех свойств метрики в метрическом пространстве $(\{\Delta q_{i_1}\}, \rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*))$ [21], так как в этом случае снижается оценка степени нечеткого равенства при росте расстояния между сравниваемыми значениями отклонений, равного $|\Delta q_{i_1} - \Delta q_{i_1}^*|$.

Таким образом, оценка (2) применяется в том случае, когда для сравниваемых значений $\Delta q_{i_1} = \langle T_{j_3}, \mu(\Delta q_{i_1}) \rangle$ и $\Delta q_{i_1}^* = \langle T_{j_3}^*, \mu(\Delta q_{i_1}^*) \rangle$ одноименного отклонения выполняется одно из условий:

$$((\mu(\Delta q_{i_1}) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1})) < \mu(\Delta q_{i_1})) \otimes ((\mu(\Delta q_{i_1}^*) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1}^*)) > \mu(\Delta q_{i_1}^*));$$

$$((\mu(\Delta q_{i_1}) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1})) > \mu(\Delta q_{i_1})) \otimes ((\mu(\Delta q_{i_1}^*) + \Delta\mu(\Delta q_{i_1}^*)) < \mu(\Delta q_{i_1}^*)),$$

т. е., когда при одном и том же приращении значения функций принадлежности для одного сравниваемого отклонения она растет, а для другого — уменьшается. В этом случае принимается решение, что сравниваемые значения одноименного отклонения Δq_{i_1} и $\Delta q_{i_1}^*$ нечетко равны между собой, если $\rho(\Delta q_{i_1}, \Delta q_{i_1}^*) \geq h$.

Отметим, что аналогичным образом вычисляется степень равенства двух нечетко представленных



значений степеней влияния одноименных возмущающих факторов на параметры состояния ОУ и степеней взаимного влияния отклонений параметров состояния ОУ друг на друга.

Пусть графы G_1^* и G_1 соответственно определяющие эталонную и проблемную ситуации на ОУ, являются структурно эквивалентными (нечетко изоморфными с точностью до одноименных пометок вершин и ребер [20]). Тогда для произвольной пары ситуаций $\langle s_K, s_{i_6} \rangle$ можно вычислить степень их нечеткого равенства $\rho(s_K, s_{i_6})$ между собой по самому «узкому» звену сравнения одноименных пометок вершин и ребер (звену, имеющему минимальное значение степени равенства) в биективно соответствующих им графах G_1^* и G_1 таким образом:

$$\rho(s_K, s_{i_6}) = \min_{j=1}^4 \left(\min_{i=1}^{V_1} \rho(v_i^{1*}, v_i^1), \min_{i=V_1+1}^{V_2} \rho(v_i^{2*}, v_i^2), \min_{k=1}^{E_1} \rho(e_k^{1*}, e_k^1), \min_{k=E_1+1}^{E_2} \rho(e_k^{2*}, e_k^2) \right), \quad (3)$$

где V_1 — число пар вершин $\langle v_i^{1*}, v_i^1 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 одноименными отклонениями параметров состояния ОУ; V_2 — число пар вершин $\langle v_i^{2*}, v_i^2 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 одноименными возмущающими факторами ОС; E_1 — число пар ребер $\langle e_k^{1*}, e_k^1 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 значениями одноименных степеней влияния различных отклонений друг на друга; E_2 — число пар ребер $\langle e_k^{2*}, e_k^2 \rangle$, соответственно помеченных в графах G_1^* , G_1 значениями степеней влияния одноименных возмущений ОС на параметры состояния ОУ.

Для отношения нечеткого равенства между собой двух произвольных ситуаций s_K, s_{i_6} можно доказать

Утверждение 1. *Бинарное отношение нечеткого равенства $\rho(s_K, s_{i_6})$ между собой произвольных ситуаций s_K, s_{i_6} , является отношением эквивалентности.* ♦

Справедливость утверждения 1 вытекает из условия того, что отношение нечеткого равенства $\rho(s_K, s_{i_6})$ обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности.

Таким образом, отношение нечеткого равенства различных ситуаций между собой фактически разбивает на классы множество возникающих на ОУ нечетко равных друг другу ситуаций $s_{i_6} \in S$, для каждого из которых формируется эталонная

ситуация $s_K \in S_{\mathcal{O}}$, являющаяся обобщением всех относящихся к этому классу проблемных ситуаций. Это подтверждает эквивалентность и равные возможности применения в ситуационном управлении эталонных ситуаций для принятия решений с классическим разбиением множества полных ситуаций на ОУ на классы $S_K \subset S$ и выбору на этой основе эффективных управлений.

Как уже отмечалось, для определения управления, позволяющего повысить точность регулирования параметров состояния ТП, требуется на основе ЛФ построить аналитическую зависимость (1). В общем случае каждая используемая для этого ЛФ определяется пятеркой: ЛФ = (Н, ЛП₃, {ЛП_{НЗ}}, М, F), где Н — название ЛФ, например, «Управление $u_{i_5}^* \in U$ параметром состояния $q_{i_1} \in Q$ »; ЛП₃ — зависимая ЛП, которая определяет управление $u_{i_5}^* \in U$; {ЛП_{НЗ}} — множество независимых ЛП, в рассматриваемом случае это размер отклонений $\Delta q_{i_1}^*$ и степень влияния возмущающего фактора d_{i_3} на параметр состояния $q_{i_1} \in Q$; М — матрица ЛФ, которая представляет соответствие между словесными (нечеткими) значениями независимой переменной и различными сочетаниями нечетких значений зависимых переменных; F — график ЛФ или аналитическая зависимость $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$, связывающая между собой количественные значения зависимой и независимых переменных.

Для построения графика ЛФ, который совпадает с уравнением регрессии $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$, связывающим параметры управления $u_{i_5}^* \in U$ с отклонениями регулируемого параметра ТП и степенью влияния действующего на него возмущающего фактора ОС, вначале формируются соответствующие им ЛП. Затем проводится опрос экспертов, по результатам которого для разных сочетаний словесных (нечетких) значений отклонения $\Delta q_{i_1}^*$ и степени влияния возмущения d_{i_3} , определяемых терминами соответствующих им ЛП, в соответствие ставятся нечеткие значения параметров результативного управления $u_{i_5}^* \in U$ и на этой основе формируется в табличной форме матрица ЛФ (см. таблицу).

В таблице, например, выделенный заливкой столбец означает, что при большом отклонении и высоком влиянии возмущения параметры результативного управления должны иметь большие значения.

Полученная таким образом матрица ЛФ позволяет по проекциям на базовые шкалы из максимумов функций принадлежности нечетких множеств,

Матрица ЛФ, определяющая соответствие между нечеткими значениями параметров управления и нечеткими значениями отклонения и возмущающего фактора ОС

Размер отклонения Степень влияния возмущения Параметры результативного управления	Очень малый Малая Очень малые	Средний Средняя Малые	Большой Высокая Большие	Большой Очень высокая Большие	Очень большой Очень высокая Очень большие
---	-------------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-------------------------------------	---

определяющих термы зависимой и независимых ЛП (см. таблицу), выявить соответствующие им наиболее вероятные численные значения. Таким образом, матрица ЛФ позволяет построить таблицу соответствия между количественными значениями зависимой переменной и независимых переменных.

Используя полученные таким образом данные в качестве статистики, набранной экспертным путем и обработав ее методом множественного регрессионного анализа [18], можно определить коэффициенты эмпирической модели $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$, которая позволяет по измеренным значениям отклонений и оценкам степени влияния возмущения $d_{i_3} \in D$, аналитическим способом определить параметры результативного управления.

Отметим, что если управление характеризуется несколькими параметрами, то для каждого такого параметра формируется собственная эмпирическая модель (1).

3. ВЫБОР УПРАВЛЕНИЯ ПО НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СИТУАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Как обосновано выше, необходимым условием выбора результативного управления $u_{i_5} \in U$ на различных уровнях ситуационной системы, при возникновении в ТП соответствующей им проблемной ситуации $s_{i_6} (o_{i_2}), s_{i_6} (ТЦ_j), s_{i_6} (ТП) \in S$, является ее нечеткое равенство с эталонной ситуацией $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, по которой данное управление было выбрано. Однако выполнение только данного условия для результативной отработки управления $u_{i_5} \in U$ на ОУ необходимо, но не достаточно. В общем случае для результативной отработки управления $u_{i_5} \in U$ соответствующая ему эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ должна быть обобщением возникшей на ОУ проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$.

Для определения в общем виде необходимых и достаточных условий, при выполнении которых управление $u_{i_5} \in U$, определяемое по эталонной ситуации $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, является результативным в произвольной проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$ на ОУ, докажем

Утверждение 2. *Эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ является обобщением произвольной проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$ на ОУ тогда и только тогда, когда выполняются условия: 1) ситуации s_K и s_{i_6} являются нечетко равными между собой; 2) для всех количественных значений одноименных пометок вершин и ребер в ситуациях s_K и s_{i_6} выполняется одно из соответствующих их содержанию условий: $\Delta q_{i_1}^* \geq \Delta q_{i_1}$; $d_{i_3}^* \leq d_{i_3}$; $e_{i_8}^* \geq e_{i_8}$, $i_8 = \overline{1, m_8}$, где $\Delta q_{i_1}^*$, $\Delta q_{i_{11}}$ — значения одноименных отклонений, которыми помечены вершины в графах G^* и G , соответственно определяющих эталонную и проблемную ситуации; $d_{i_3}^*$, d_{i_3} — значения базовой переменной одноименных возмущений, которыми помечены вершины в соответственно графах G^* и G ; $e_{i_8}^*$, e_{i_8} — значения одноименных пометок ребер соответственно в графах G^* и G ; m_8 — число ребер в графах G^* и G . ♦*

Справедливость утверждения 2 вытекает из того, что при выполнении приведенных в нем условий п. 1 и 2, если управление $u_{i_5} \in U$ результативно в эталонной ситуации, то оно также будет результативно и в проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$, так как эти ситуации нечетко равны между собой, а ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ является нечетким обобщением ситуации $s_{i_6} \in S$.

Утверждение 3. *Пусть эталонная ситуация $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ является обобщением проблемной ситуации $s_{i_6} \in S$, наблюдаемой на ОУ в текущий момент времени t . Тогда отработка управления $u_{i_5} \in U$, выбранного по эталонной ситуации $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, позволяет преобразовать наблюдаемую проблемную ситуацию $s_{i_6} \in S$ в такую текущую ситуацию $s_{i_6}^*$ на ОУ, которая нечетко равна целевой ситуации $s_{Ц}$, определяющей заданный режим его функционирования. ♦*

Справедливость утверждения 3 следует из условия, что по определению ситуационного управления, с одной стороны, управление $u_{i_5} \in U$, выбранное по эталонной ситуации $s_K \in S_{\mathcal{E}}$, позволяет устранив все зафиксированные в ней отклонения параметров состояния ОУ, т. е. преобразовать ее в требуемую целевую ситуацию. С другой же стороны, в силу нечеткого равенства ситуаций s_K и s_{i_6}



между собой, управление $u_{i_5} \in U$ позволяет преобразовать проблемную ситуацию $s_{i_6} \in S$ в такую ситуацию $s_{i_6}^*$, которая согласно утверждению 1 будет нечетко равной целевой ситуации $s_{Ц}$.

Отметим, что если обработка управлений $u_{i_5} \in U$ не обеспечивает требуемой точности регулирования параметров состояния ОУ, то полученный результат, т. е. ситуация $s_{i_6}^*$, корректируется путем обработки дополнительных управлений, определяемых по эмпирической модели $u_{i_5}^* = a_1 \Delta q_{i_1}^* + a_2 d_{i_3}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основная проблема практической реализации предложенной многоуровневой ситуационной модели связана с получением экспертных данных, позволяющих выполнить обобщенное описание эталонных проблемных ситуаций для различных уровней управления ТП и определить эффективные в них управления. При наличии такой информации создание базы знаний многоуровневой ситуационной системы управления и автоматическое принятие управленческих решений на основе предложенных в работе инструментальных средств тривиально и сводится к построению соответствующих ее различным уровням логико-трансформационных правил вывода.

Пусть, например, возникла проблемная ситуация, связанная с поступлением на вход ТЦ_j заготовок для изготовления многоступенчатых валов с «малым», но недопустимым отклонением от размеров, предусмотренных программой их обработки на токарном станке с ЧПУ, и одновременно с этим наблюдается «средний» износ режущего инструмента. В этом случае сформированное для данной проблемной ситуации логико-трансформационное правило вывода определяет управление, согласно которому необходимо в программе обработки заготовок соответствующим образом увеличить число проходов режущего инструмента при заданной толщине съема металла за один проход. Правила вывода данного вида позволяют повысить качество обработки деталей и минимизировать брак на выходе ТП в случае изменения условий его реализации.

Допустим, на втором уровне ситуационного управления ТП возникла проблемная ситуация, связанная с выходом из строя оборудования ТЦ_j, используемого для выполнения технологической операции $o_{j_i} \in O_j$, а технологический маршрут ТМ_j допускает изменение последовательности входящих в него операций. Для данного случая с целью снижения негативных последствий, связанных с

разбалансированием «Выхода» цепочки ТЦ_j с «Входом_{j+1}» цепочки ТЦ_{j+1} в ситуационной модели управления выбирается логико-трансформационное правило вывода, позволяющее реализовать управление, обеспечивающее допустимую перестановку технологических операций в технологическом маршруте ТМ_j таким образом, чтобы операция $o_{j_i} \in O_j$ выполнялась как можно позже. Такие правила вывода позволяют минимизировать суммарные потери времени ТП, возникающие в результате выхода из строя технологического оборудования.

Первый уровень ситуационного управления, например, решает задачи, связанные с автоматической переналадкой технологического оборудования при смене обрабатываемых деталей.

В настоящее время ведется разработка программного обеспечения многоуровневой ситуационной модели управления ТП изготовления многоступенчатых валов, состоящего из двух ТЦ: механической обработки заготовок и закалки получаемых изделий.

Предложенная многоуровневая ситуационная модель может быть эффективно применена не только для управления ТП, но и для управления поведением различных сложных ОУ в нестабильной среде. Например, для управления целенаправленным поведением автономного интеллектуального робота в процессе манипулирования объектами в недоопределенных условиях ОС. В этом случае управления $u_{i_5} \in U$ в логико-трансформационных правилах вывода заменяются на выполняемые роботом действия. Например, если объект ОС находится «рядом» и имеет «малый» вес и «малые» габариты, то он может быть захвачен рабочим органом манипулятора робота.

В общем случае эффективность практического применения предложенной многоуровневой модели ситуационного управления сложными объектами в нестабильной окружающей среде обусловлена решением в работе следующих основных подзадач:

— декомпозиции всей задачи управления, имеющей большую размерность, на подзадачи по уровню общности показателей состояния ОУ и параметров управления с последующим определением на этой основе различных уровней иерархии вывода решений;

— разбиения на основе накопленного опыта управления множества возникающих на различных уровнях ОУ проблемных ситуаций $s_{i_6} \in S$ на классы $S_K \subset S$ аналогичных или нечетко равных между собой ситуаций;

— построения с помощью ЛП эталонных ситуаций $s_K \in S_{\mathcal{E}}$ для каждого полученного класса $S_K \subset S$ проблемных ситуаций на различных уровнях иерархии управления;

— формирования на основе накопленного опыта управления и данных, полученных экспертным путем, логико-трансформационных правил вывода для каждого уровня ситуационного управления поведением сложного объекта.

В совокупности решение перечисленных задач позволяет эффективным образом реализовать анализатор, классификатор, коррелятор и экстраполятор ситуационной системы управления [16] сложными объектами различной природы в нестабильной среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе модель представления и обработки знаний позволяет организовать многоуровневую систему ситуационного управления поведением сложных технологических процессов и других различных сложных объектов управления в нестабильных условиях окружающей среды.

Применение лингвистических переменных для представления отклонений параметров состояния технологического оборудования, входящего в структуру технологического процесса и действующих в окружающей среде возмущающих факторов, позволяет обобщить модель представления знаний и на этой основе реализовать эффективный принцип сравнения эталонных и проблемных ситуаций в процессе выбора результативных управлений.

Применение лингвистических функций для обработки экспертных данных позволяет формировать эмпирические модели, определяющие аналитическую связь между параметрами результативных управлений, показателями состояния технологического процесса и влияющими на него возмущениями, а затем обеспечить на этой основе требуемую точность регулирования его состояния в нестабильных условиях окружающей среды.

Сформулированные требования к эталонным ситуациям, которые являются обобщением проблемных ситуаций на объекте управления, обеспечивают возможность выбора результативных управлений, реализация которых позволяет поддержать заданное состояние технологического процесса в течение всего периода его реализации в нестабильной окружающей среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ицкович Э.Л.* Методы рациональной автоматизации производства. — М.: Инфра — Инженерия, 2009. — 256 с.
2. *Ицкович Э.Л.* Методы комплексной автоматизации производства предприятий технологических отраслей. — М.: КРАСАНД, 2013. — 232 с.
3. *Тимофеев Г.А., Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д.* Статистические методы управления технологическими процессами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2016. — № 12. — С. 58—63.

4. *Тогашов А.Ю., Гончаров А.А., Самотылова С.А.* Современные методы построения усовершенствованного управления технологическими процессами // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. — 2016. — № 4. — С. 102—108.
5. *Ицкович Э.Л.* Интеллектуальность средств и систем автоматизации Honeywell // Автоматизация в промышленности. — 2006. — № 6. — С. 3—8.
6. *Орешкин О., Спасивцев А., Дайманд И.* и др. Синтез интеллектуального автоматизированного управления сложными ТП // Автоматизация в промышленности. — 2013. — № 7. — С. 3—9.
7. *PL Copen.* Standartization in Industrial Control Programming. Profiles, Products & Services of PLCopen Members. April, 1996.
8. *Фельдштейн Е.Э., Корневич М.А.* Автоматизация производственных процессов в машиностроении. — Вологда: Инфра — Инженерия, 2016. — 246 с.
9. *Шишмарев В.Ю.* Автоматизация технологических процессов. — М.: Академия, 2016. — 352 с.
10. *Трофимов В.Б., Кулаков С.М.* Интеллектуальные АСУ технологическими объектами. — Вологда: Инфра — Инженерия, 2016. — 232 с.
11. *Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я.* Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
12. *Зубарев Ю.Я.* Автоматизация процессов управления в судостроении. — Л.: Судостроение, 1978. — 264 с.
13. *Мелехин В.Б., Хачумов В.М.* Модель ситуационного управления сложными технологическими процессами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2017. — № 5. — С. 25—30.
14. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация: методы получения и анализа. — М.: Радио и связь, 1982. — 184 с.
15. *Мелехин В.Б., Хачумов В.М.* Динамическая модель представления знаний в интеллектуальных системах контроля сложных технологических процессов // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2017. — № 2. — С. 31—43.
16. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
17. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 167 с.
18. *Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М.* Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 1. — Том 44. — С. 48—60.
19. *Драйнер М., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. Кн. 1. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.
20. *Берштейн Л.С., Мелехин В.Б.* Планирование поведения интеллектуального робота. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 240 с.
21. *Коришнов Ю.М.* Математические основы кибернетики. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 496 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Мелехин Владимир Борисович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, ✉ pashka1602@rambler.ru,

Хачумов Вячеслав Михайлович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва; зав. лабораторией, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский, ✉ vmh48@mail.ru.

*Поступила в редакцию 19.06.2018, после доработки 18.09.2018.
Принята к публикации 12.11.2018.*

ПОСТРОЕНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ТРАЕКТОРИИ

М.Х. Дорри, А.А. Рощин, Л.А. Серeda

Представлен фрагмент стенда для визуализации работы системы управления подводного аппарата, позволяющего визуально оценивать работу алгоритмов управления при движении по заданной траектории в условиях сложного рельефа дна.

Ключевые слова: подводный аппарат, рельеф дна, движение по траектории, программный комплекс, визуализация, исследовательский стенд.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из необходимых свойств перспективного беспилотного подводного аппарата (ПА) состоит в его способности действовать в непосредственной близости от берегов и дна водоемов.

В процессе разработки системы управления движением ПА необходимо ее моделирование в целях выбора структуры системы, проверки алгоритмов, настройки коэффициентов и т. п. Представление результатов моделирования в виде чисел, таблиц и графиков позволяет оптимизировать и фиксировать точные значения отклонений параметров движения от заданных. Для оценки пригодности того или иного алгоритма весьма полезна система визуализации результатов моделирования, отображающая движение ПА относительно дна и других объектов. При наличии таковой системы исследователь, выбирающий и проверяющий алгоритмы управления, сможет достаточно быстро оценить ситуацию, в которой алгоритм не справился с управлением (крутой изгиб заданной траектории с узкой трубкой допустимых отклонений, близость дна со сложным рельефом и т. п.).

1. ОБЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МАКЕТА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА

Визуализация движения судна по траектории актуальна в системах поддержки принятия решений [1], а также при разработке и проверке алго-

ритмов управления движением [2]. В работе [3] авторами приведены алгоритмы управления движением судна по заданной траектории. Дальнейшим развитием проведенных исследований стала разработка стенда для моделирования системы управления движением ПА и уточнение параметров алгоритмов при движении по заданной траектории в сложных условиях.

На рис. 1 изображен фрагмент структурной схемы стенда, созданного в программном комплексе РДС, разработанном в ИПУ РАН [4]. Программный комплекс обладает рядом свойств, позволя-

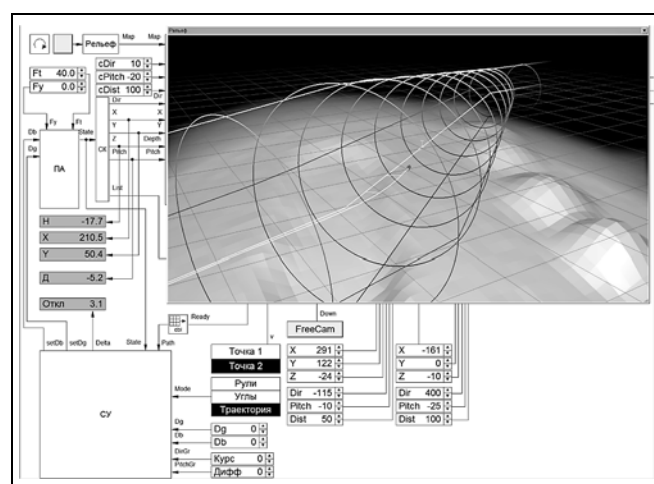


Рис. 1. Фрагмент структурной схемы системы управления и блока визуализации

ющих решать такого рода задачи при управлении движением судов. К таким свойствам можно отнести:

— возможность создания анимированных изображений, вид которых изменяется согласно параметрам моделируемого объекта (в данном стенде эта возможность используется для трехмерного отображения ситуации вокруг моделируемого ПА, отображения заданной траектории и др.);

— возможность включения в стенд программ на языке высокого уровня, обеспечивающих доступ ко всем функциям операционной системы для работы с файлами, для связи по сети и др. (в данном стенде эта возможность используется для организации хранения карты рельефа дна в файлах на диске и подгрузки их в память по мере перемещения ПА);

— возможность использования при моделировании сложных структур данных для описания параметров моделируемых объектов (в данном стенде это используется для моделирования параметров множества окружающих ПА объектов, описания рельефа дна, заданной траектории);

— гибкие средства взаимодействия между интерфейсными и расчетными блоками стенда (это используется для введения в стенд произвольного количества окружающих объектов, взаимодействия модели ПА с блоком описания рельефа, задания различных точек наблюдения за ситуацией — как фиксированных, так и перемещающихся вместе с ПА).

2. БЛОК ВИЗУАЛИЗАЦИИ

При создании стенда был разработан блок визуализации движения, позволяющий отображать в трехмерном пространстве произвольную линию заданной траектории с трубкой допустимых отклонений и рельеф дна в районе движения ПА с возможностью рисования линии сечения рельефа с горизонтальной плоскостью на текущей глубине погружения ПА.

Блок визуализации взаимодействует с блоком формирования матриц отсчетов глубин «Рельеф» (см. рис. 1), обеспечивающим динамическую загрузку данных рельефа дна вблизи текущего положения ПА с диска. Вся карта рельефа делится на квадратные ячейки с заданной стороной. Каждый такой квадрат представляет собой квадратную матрицу отсчетов глубин, взятую с постоянным шагом по обеим координатам в плоскости XU (шаг одинаков для всех ячеек). Например, если сторона ячейки карты — 500 м, и отсчеты в них записаны с шагом 20 м, каждая ячейка будет представлена матрицей 25×25 элементов.

В процессе перемещения ПА блок визуализации запрашивает у блока формирования необходимые ему ячейки карты и получает в ответ соответствующие матрицы с данными загруженных квадратов. В процессе работы блок визуализации запрашивает общие параметры рельефа дна, т. е. размер ячейки и шаг отсчетов. Они загружаются один раз в начале обмена данными между блоками, далее используются их запомненные значения. Если по какой-либо причине эти параметры должны быть изменены в реальном времени (например, аппарат вышел в район, для которого доступна более подробная карта рельефа дна с меньшим шагом отсчетов), блок формирования матриц отсчетов глубин может сообщить об этом блоку визуализации, в результате чего последний вновь запросит общие параметры рельефа дна. В процессе работы блок визуализации постоянно обращается к блоку формирования матриц отсчетов глубин, сообщая ему номера (координаты) ячеек, которые требуется загрузить. В ответ на такой запрос блок формирования матриц отсчетов глубин передает матрицу, составленную из отсчетов запрошенной ячейки.

3. ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА

Рассмотрим подробнее источники данных о рельефе дна. Они могут быть различными: хранящаяся в памяти карта, выходные данные блоков, моделирующих работу интеллектуальных гидроакустических приборов и др. В созданном стенде данные отсчетов глубин загружаются с диска из заранее подготовленных файлов. Для удобства подготовки и проверки подготовленных данных разработана программа цветовой визуализации карты глубин. Такое изображение позволяет примерно представить себе карту рельефа дна и заметить грубые ошибки оцифровки.

Для построения изображения в блоке визуализации необходимо одновременно иметь данные нескольких соседних ячеек, находящихся в поле зрения наблюдателя. Число этих ячеек зависит от установленной в настройках блока визуализации дальности видимости рельефа и размера самих ячеек. Чтобы изображаемая поверхность дна не обрывалась в пустоту за пределами загруженных ячеек, по мере отдаления деталей рельефа от ПА при его движении яркость этих деталей плавно уменьшается до полного слияния их с цветом фона. В блоке визуализации загрузкой и яркостью элементов рельефа управляют параметры *радиус неизменности цвета* R_0 , *радиус затемнения* R_1 и *радиус загрузки* R_2 (рис. 2).

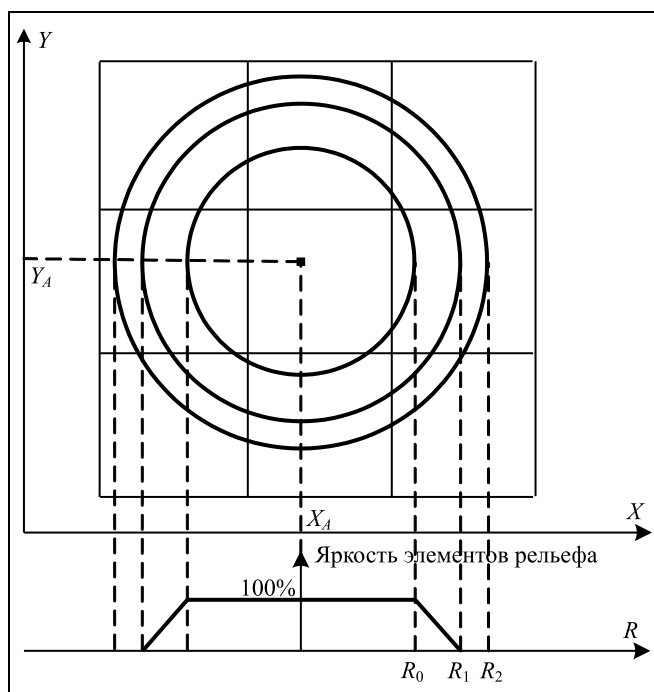


Рис. 2. Область загрузки и отображения рельефа дна

Для рисования поверхности дна по матрицам, полученным от блока формирования матриц отсчетов глубин, в блоке визуализации используется стандартная графическая библиотека OpenGL. Все матрицы отсчетов глубин для ячеек, хотя бы частично лежащих в пределах круга с радиусом загрузки R_2 и центром в точке положения ПА (x_A, y_A), хранятся в памяти блока визуализации, и по ним осуществляется построение трехмерной поверхности. Как только аппарат смещается настолько, что в пределы круга попадает отсутствующая в памяти ячейка, данные его отсчетов глубины запрашиваются у блока формирования матрицы. Вышедшие из круга ячейки удаляются из памяти блока. Таким образом, блок визуализации хранит только данные всех отсчетов глубины в радиусе R_2 вокруг ПА, что позволяет оптимизировать объем используемой памяти.

При построении трехмерного изображения поверхности все ее точки, находящиеся внутри круга с радиусом неизменности цвета R_0 , окрашиваются в цвет, заданный в настройках блока визуализации с учетом расчетов освещенности условным источником света (эти расчеты производятся автоматически библиотекой OpenGL, без них поверхность не выглядела бы трехмерной). Яркость точек, находящихся от ПА на расстоянии больше R_0 , линейно падает до нуля на расстоянии радиуса затемнения R_1 , после которого точки фактически не отоб-

ражаются и сливаются с цветом фона. Значение R_1 следует выбирать меньшим значения R_2 , чтобы очередная ячейка с отсчетами глубины загружалась в память несколько раньше, чем ее данные потребуются для построения изображения.

Блок визуализации может налагать на строящуюся поверхность горизонтальную прямоугольную сетку в плоскости на текущей глубине погружения ПА и рисовать линию пересечения этой плоскости с элементами рельефа (рис. 3). Это позволяет исследователю визуально оценить положение ПА относительно дна при наблюдении за работой того или иного алгоритма управления.

Траектория, по которой ПА должен следовать, задается в виде ломаной линии. Блок визуализации строит эту линию вместе с трубкой допустимых отклонений, которая изображается в виде набора цветных окружностей заданного в каждой точке траектории радиуса (рис. 4), плоскости ко-

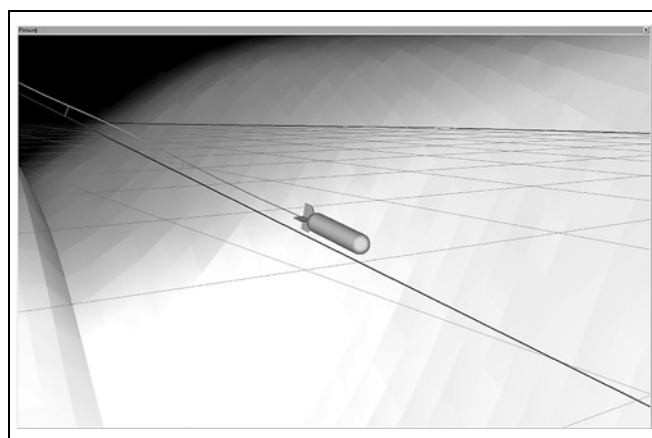


Рис. 3. Горизонтальная плоскость на глубине погружения подводного аппарата и ее пересечение с рельефом

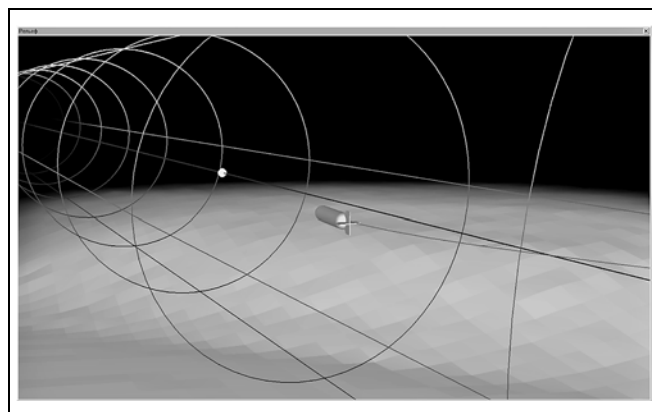


Рис. 4. Движение подводного аппарата в трубке допустимых отклонений

торых перпендикулярны линии траектории. В процессе движения ПА блок также отображает в виде линии его реальную траекторию, цвет участков которой меняется при приближении к максимально допустимому отклонению. Фактическая и заданная траектория через заданные интервалы соединяются линиями, чтобы исследователю было видно отклонение от заданной траектории.

В зависимости от выбранного алгоритма управления блоком визуализации отображаются дополнительные метки, облегчающие отладку и проверку алгоритма. Например, на рис. 4 иллюстрируется управление с учетом касательной к заданной траектории в вынесенной вперед точке, поэтому на линии заданной траектории перед ПА изображается точка определения касательной, к которой ПА стремится согласно алгоритму. Блок также позволяет показывать положение произвольного числа других точечных объектов, как неподвижных, так и перемещающихся (имеющих собственную модель).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В описанном макете исследовательского стенда не используются данные реальных рельефов дна. Он требует доработки и сопряжения с существующими форматами карт глубин и данными о рельефах, поступающими с гидролокатора.

Данный макет иллюстрирует подход к визуализации движения ПА вблизи дна, и его применение позволяет исследователю и разработчику алгоритма в процессе моделирования представить себе поведение ПА и быстро отсеять грубые ошибки в алгоритме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вересников Г.С., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Система поддержки принятия решений по выбору траектории и параметров движения морского подводного объекта // Сб. науч. тр. Военно-морского инженерного ин-та. — 2009. — Т. 2. — С. 106—121.
2. Киселев Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей // Подводные исследования и робототехника. — 2001. — № 1 (11). — С. 24—31.
3. Дорри М.Х., Никишов С.М., Острецов Г.Э. и др. Исследование и сравнение трех систем управления движением судна по заданной траектории // Судостроение. — 2017. — № 4. — С. 37—39.
4. Дорри М.Х., Рошин А.А. Программный комплекс для моделирования и исследования систем управления «Расчет динамических систем (РДС)»: Справ. руководство. Ч. 1. Устройств РДС и редактирование схем. — М.: ЛЕНАНД, 2017. — 344 с.
5. Дорри М.Х., Рошин А.А. Программный комплекс для моделирования и исследования систем управления «Расчет динамических систем (РДС)»: Справ. руководство. Ч. 2. Разработка собственных автокомпилируемых блоков. — М.: ЛЕНАНД, 2017. — 480 с.

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

Дорри Манучер Хабибуллаевич — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ✉ dogrimax@lab49.ru,

Рошин Александр Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ✉ rochinaa@mail.ru,

Серда Леонид Анатольевич — науч. сотрудник, ✉ sereda@lab49.ru,

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

*Поступила в редакцию 02.07.2018, после доработки 04.10.2018.
Принята к публикации 17.10.2018.*

Новая книга

Сидельников Ю.В. Экспертное прогнозирование. Монография. — М.: Доброе слово, 2018. — 248 с. — ISBN 978-5-89796-632-X.

Автором поставлена цель содействовать данной публикацией взаимопониманию англоязычных и русскоговорящих исследователей прогностики и повышению уровня качества прогнозов. Выявлены и систематизированы недостатки и трудности субъектов, участвующих в экспертном прогнозировании, и их заблуждения. Рассмотрен ряд базовых тем теории экспертной прогностики. Представлен системный анализ технологии экспертного прогнозирования. Разработаны подходы к определению меры уверенности эксперта в своей оценке и метод двухуровневого сценария. Дан аналитический обзор 11-ти простейших видов экспертных оценок, причем особое внимание обращено на работы, в которых описаны экспериментальные исследования экспертных оценок, а также обзор подходов к систематизации методов прогнозирования. Рассмотрены состояние и тенденции развития экспертизы, обоснована необходимость создания новой междотраслевой дисциплины — экспертологии, выделены ее объект и субъекты, проанализированы специфика, основные понятия и принципы экспертологии, предложена ее частная парадигма. Апробирован метод двухуровневого сценария при разработке прогноза безработицы в России. Предложенные подходы могут быть применены для разработки экспертных прогнозов.

Для специалистов, занимающихся проблемами теории и практики экспертной прогностики, а также студентов и аспирантов, интересующихся данной тематикой.

Рецензенты: д-р экон. наук А.И. Агеев, д-р техн. наук В.Н. Бурков.

- A. Sapronov, V. Belavin, K. Arzymatov, et al.** Tuning hybrid distributed storage system digital twins by reinforcement learning. P. 1—12.
- V.S. Viktorova, N.V. Lubkov, A.S. Stepanyants.** A Unified Approach to Reliability, Availability, Performability Analysis Based on Markov Processes with Rewards. P. 13—38.
- A.F. Sadek, M.M. El-Din, Sh. Elmeghawry.** Estimation of Stress-Strength Reliability for Quasi Lindley Distribution. P. 39—51.
- E.P. Rostova, M.I. Geraskin.** Costs Function Optimization for Prevention of Firm's Industrial Risks With Regard to Reinvestment of Profit. P. 52—63.
- A. Ashimov, Yu. Borovskiy.** Solution of one Global Problem by Approach of the Parametric Control Theory. P. 64—73.
- R. Raghavachari, M. Sridharan.** Modeling and Simulation of Frequency Response Masking FIR Filter Bank using Approximate Multiplier for Hearing Aid Application. P. 74—91.
- M.S. Kumar, D.S. Rao, M.R. Raju.** Design of Robust Stabilizing PI/PID Controller for time delay Interval Process Plants Using Particle Swarm Optimization. P. 92—120.
- E.A. Umoh, O.N. Iloanusi.** Chaotic Analysis and Improved Finite-Time Adaptive Stabilization of a Novel 4-D Hyperchaotic System. P. 121—135.
- G.A. Ougolnitsky, T.Yu. Anopchenko, O.I. Gorbaneva, et al.** Systems Methodology and Model Tools for Territorial Sustainable Management. P. 136—150.



**Содержание сборника
«Управление большими системами»**

2018, вып. 76

- Абрамова Н.А., Коврига С.В., Порцев Р.Ю.** О развитии рефлексивного подхода к анализу обоснования субъективных управленческих решений посредством когнитивного моделирования
- Базовкин А.В.** Об одном методе упорядочивания перечня геолого-технических мероприятий
- Белов М.В.** Проблемы управления жизненными циклами организационно-технических систем
- Бурков В.Н., Еналеев А.К., Строгонов В.И.** Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта). II. Модель механизма стимулирования энергоэффективности и элементы структуры управления проектами
- Карпова И.П., Карпов В.Э.** Агрессия в мире аниматов, или о некоторых механизмах управления агрессивным поведением в групповой робототехнике
- Краснова С.А.** Оценивание производных внешних возмущений на основе виртуальных динамических моделей
- Мирошник С.Н., Гончар Д.Р.** Вычисление верхней оценки избыточности данных и ее использование при определении времени доступа модулей к БД в реальном времени
- Ратнер С.В.** Динамические модели экологического анализа среды функционирования с переменными запаса и потока
- Селезнева И.Е.** Математическая модель процесса организации системных исследований

Тексты статей в свободном доступе на сайте <http://ubs.mtas.ru/>



CONTENTS & ABSTRACTS

DIGITAL ENERGY DEVELOPMENT PROBLEMS
IN RUSSIA. 2

Voropay N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P., et al.

It is noted that in the face of the exhaustion of extensive exploitation potential of raw materials, digital transformation is a «window» of great opportunities for Russia. It is shown that in such conditions the need for digitalization of energy systems increases, taking into account the complexity and reduction of self-adaptation and self-sustainability to many destabilizing factors. A comparative assessment of the level of attention from specialists to cross-cutting digital technologies in various sectors of the economy has been carried out, which resulted in the conclusion that in the energy sector this attention has a clear reserve of growth. It is noted that a significant part of sophisticated modern digital equipment is supplied to the energy industry by foreign firms, which is a clear threat to the country's energy security and requires increased attention to solving the problem of importing independency. It justifies the need to ensure a leading strategic role of the Russian Academy of Sciences in the breakthrough development of Russian digital energy.

Keywords: artificial intelligence, computer modelling, breakthrough development, digital technologies, digital energy, energy security.

IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF MEETINGS
IN SMALL GROUPS. PART 2. NON-STANDARD
APPROACHES TO THE PROBLEM 15

Sidelnikov Yu.V., Ryapukhin A.V.

Main approaches to the problem of the improvement of staff meetings efficiency have been classified. As opposed to traditional approaches described in the first part of this work, non-standard approaches to the problem of the improvement of meetings efficiency in small groups have been considered. Special attention has been paid to psychology of small groups, to motivation methods, and to the theory of group decision-making. A short review of meeting types has been offered. New research topics have been described, which may contribute to the improvement of meetings efficiency.

Keywords: meeting, efficiency of the meeting, meetings types, new research topics.

MODELING THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS
ON THE EMERGENCE OF SPECIALIZATION
IN ABSTRACT SYSTEMS. 26

Aleskerov F.T., Tverskoi D.N.

We propose a model of specialization in abstract systems with a resource constraint and under the assumption that all structural constraints in the model are linear functions. We study essential properties of solutions to the problem of efficiency maximization of system functioning. We show how and when specialization emerges in the system containing identical elements.

Keywords: abstract systems, specialization, resource constraint, structural constraints, efficiency.

SYNTHESIS OF NONLINEAR DYNAMICS METHODS
AND REGRESSION ANALYSIS FOR THE STUDY
OF SOCIO-ECONOMIC PROCESSES. 32

Polunin Yu. A.

In this article the synthesis of regression analysis methods with the tools of nonlinear dynamics analysis is proposed. Such an approach proves effective in case of analysis of empirical data of nonlinear processes developing under conditions of constraint, provided that the increments of processes are proportional to the achieved level adjusted for the constraints. Application of the method proposed is demonstrated by example of the analysis of revenue dynamics of Russian large and medium-sized companies from 2009 to 2015. The generalizing results obtained allow to classify the companies by the nature of changes in revenue as well as to assess their current positions and further dynamics. The models are proposed for different mechanisms of process development which manifest in a variety of constraints.

Keywords: nonlinear processes, empirical data, mappings as models of nonlinear dynamics, growth rates, regression analysis models, correlation of parameters of maps and regression coefficients, singular points, stability.

METHODICAL APPROACH TO MODELING
OF THE RATIONAL SCENARIO OF ENSURING
ECONOMIC SECURITY OF RUSSIA
IN THE LONG TERM 45

Troshin D.V.

On the base of factorial model a methodical approach to complex accounting of various factors of economy functioning, threats and measures of

counteraction to them with use of nonlinear convolution and logistic functions is offered. A function of integration of assessment of economic security condition during the long-term planning period is introduced. This function is offered as target for rational distribution of budget allocations for measures during planning. Various approaches to integrating of indicators and defining of preferences are considered. It is offered to use an additive form for utility functions. A set of target indicators of economic security is offered.

Keywords: economic security, factor, indicator, complex function, factorial model, threat, measure, preference.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ACTIVE
FORECASTS ON THE ENERGY MARKETS
ON THE EXAMPLE OF THE EUROPEAN
GAS MARKET 55

Shevyrenkov M.Yu.

In this paper, the problems of assessing the impact of active forecasts on energy markets are considered. An imitative game reflexive model describing the behavior of producers on the natural gas market is presented. With the help of regression analysis, the influence of the values of various forecast parameters on the behavior of energy market participants was studied.

Keywords: energy industry, forecasting, forecasting methods and models, informative control.

Z-RECURRENT PROCESS STRUCTURES IN PROBLEMS
OF CONTROL AND DIAGNOSTICS 63

Tverdokhlebov V.A.

The main provisions, models and methods for solving the problems of control and diagnosing of processes in the system by the indicators of changes in the relationships of events in processes are developed. For this, for the first time the classical recursive definition of sequences is extended to Z-recurrent definition of sequences, which allows to represent processes by formal models in the form of orders of Z-recurrent forms. A classification of the orders of Z-recurrent forms and algorithms for solving the problems of control and diagnosing processes to a system using the representation of processes by the orders of Z-recurrent forms are developed. To increase the efficiency of calculating the orders of Z-recurrent forms, an algebra of the precedence relations of elements has been developed, the formulas of which allow one to develop methods for calculating the orders of Z-recurrent forms.

Keywords: control and diagnostic problem, complex system, process, event, Z-recurrent definition of the sequence, order of the Z-recurrent form, the algebra of the precedence of elements in a sequence.

MULTI-LEVEL MODEL OF SITUATIONAL
MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES
OF MACHINING. 73

Melekhiin V.B., Khachumov V.M.

The principle of organization of a multi-level situational control model for complex technological processes in uncertain environment is proposed. The tools are developed that present and process technological knowledge obtained by experts, based on the use of fuzzy set apparatus, which allows generalizing the representation of reference situations and on this basis reducing the number of decision rules used in the situational control model. The basic conditions are determined that ensure the possibility of prompt comparison of reference and problem situations and of the choice of effective controls on this basis.

Keywords: technological process, technological equipment, multilevel model, situational management, reference situation, problem situation, linguistic variables and functions.

RESEARCH STAND FOR VISUALIZATION
OF THE MOTION OF A SUBMERSIBLE VEHICLE
ALONG THE TRAJECTORY 83

Dorri M.Kh., Roshchin A.A., Sereda L.A.

The paper covers a part of the visualization research stand for the motion automatic control system of a submersible vehicle allowing the visual evaluation of control algorithms during the motion along the predefined trajectory near the complex sea bottom contour.

Keywords: submersible vehicle, sea bottom contour, predefined trajectory motion, software complex, visualization, research stand.

