

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ  
СИСТЕМ – 55 ЛЕТ  
(ТАС-55)**

**ТРУДЫ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**(18 НОЯБРЯ 2024 г., МОСКВА, РОССИЯ)**

*Под общей редакцией академика РАН Новикова Д.А., д.т.н. Буркова В.Н.*

НАУЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

**Москва  
ИПУ РАН  
2024**

**УДК 658.51.011: 519.7**  
**ББК 65.011: 65.050.2: 22.18**  
... Т33

**Теория активных систем – 55 лет (ТАС-55):** труды юбилейной научно-практической конференции, 18 ноября 2024, г. Москва / под общ. ред. Д.А. Новикова, В.Н. Буркова; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. – Электрон. текстовые дан. (6,9 Мб). – М.: ИПУ РАН, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Мин. систем. требования: Pentium 4, 1,3 ГГц и выше; Windows 7/8 и выше; Acrobat Reader 4.0 или выше. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-91450-280-2. – Текст: электронный.

В научном электронном издании представлены труды юбилейной научно-практической конференции «Теория активных систем – 55 лет (ТАС-55)» по трем направлениям:

- Модели и механизмы ТАС. В этом разделе представлены доклады, в которых разрабатываются и развиваются теоретические основы ТАС.
- Прикладные задачи ТАС. В этом разделе представлены доклады, рассматривающие применение ТАС в различных прикладных задачах.
- Активные сетевые структуры. В этом разделе представлены доклады интенсивно развивающегося направления ТАС, в котором основным предметом исследования является структура взаимосвязей (в первую очередь информационных) участников активных систем.

Сборник трудов конференции предназначен для научных работников и специалистов в области управления организационными системами.

*Текст научного электронного издания  
воспроизводится в том виде, в котором представлен авторами*

**Утверждено к изданию Программным комитетом конференции**

# СОДЕРЖАНИЕ

## СЕКЦИЯ 1. Прикладные задачи ТАС

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОИСКА РАВНОВЕСИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ Акинфиев В. К. ....	6
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СРОКОВ ВЫПОЛНЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ И ФЕДЕРАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ Албычев А.С., Червяков А.А., Никульчев Е.В., Ильин Д.Ю., Газанова Н.Ш. ....	11
МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ОСНОВАННАЯ НА СЛУЧАЙНЫХ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССАХ Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. ....	16
ПРОГНОЗНАЯ АНАЛИТИКА БОЛЬШИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ Добронец Б.С., Попова О.А. ....	20
ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОАКТИВНОЙ АДАПТАЦИЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ К УСКОРЯЮЩИМСЯ ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА Еналеев А.К., Цыганов В.В., Вера А.Ю. ....	26
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ КОНВЕРТЕРОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ КВАЗИПЕРИОДИЧНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ Зимин А.В., Зимин В.В., Корнет М.Е., Буркова И.В. ....	32
УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РАЗВИТИЕМ АВИАСТРОЕНИЯ И ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ Клочков В.В. ....	37
ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПРЕЦЕДЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ Кулаков С.М., Киселёва Т.В., Койнов Р.С., Тараборина Е.Н. ....	47
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЩАТЕЛЬНОГО РЕСУРСА В ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОТИВОБОРСТВЕ Петров А.П., Подлипская О.Г. ....	57
ТОЧНЫЕ ОЦЕНКИ ЧИСЛА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПОСТАНОВКЕ М.И. РУБИНШТЕЙНА Пономарев Ю.Ю. ....	61
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ВНУТРИФИРМЕННОГО ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ Россихина Л.В., Резников Д.А. ....	67
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА Столбов В.Ю., Онискив В.Д., Макаров В.Ф., Песин М.В., Щелудяков А.М. ....	70
ИНТЕГРАЦИЯ АКТИВНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЯМИ И ИНЖЕНЕРНЫМИ ДАННЫМИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ Трибелев А.А. ....	73
ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ Угольницкий Г.А. ....	80
СТРАТЕГИЧЕСКИЕ АДАПТИВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МОБИЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА Цыганов В.В. ....	86

## СЕКЦИЯ 2. Модели и механизмы ТАС

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЯГКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПРОЕКТАМИ В УПРАВЛЕНИИ ПРОГРАММАМИ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ Бурков В.Н., Буркова И.В., Щепкин А.В. ....	95
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ НА ОСНОВЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАНЖИРОВАНИЯ Бурков В.Н., Заложнев А.Ю. ....	101
МНОГОШАГОВАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ИГРА НА ПОДДЕРЖАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ Горелов М.А. ...	104
ОПТИМАЛЬНОСТЬ ПРИНЦИПА СОГЛАСОВАНИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ Еналеев А.К. ....	109
ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАВКАМИ В ОНЛАЙН-АУКЦИОНАХ И АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗАЦИИ Жуховицкий К.М., Киселева Т.В. ....	117

МЕТАТЕОРЕМА КАК МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ ТЕОРЕМ СУЩЕСТВОВАНИЯ РАВНОВЕСИЯ В БЕЗОПАСНЫХ СТРАТЕГИЯХ ИСКАКОВ М.Б. ....	125
УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КАЛЯНОВ Г.Н. ....	128
ПРОТИВОЗАТРАТНЫЙ МЕХАНИЗМ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПОЧКЕ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАШЕНКОВ А.Р. ....	134
ТЕОРИЯ ОБЩИХ СИСТЕМ И ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ ЛЕЩЕНКО В. В. ....	137
<b>СЕКЦИЯ 3. Активные сетевые структуры</b>	
СЕТЕВЫЕ И НЕСЕТЕВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СОЧИ-МОДЕЛИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ГОРБАНЕВА О.И. ....	144
РОЛИ ОРГАНИЗАТОРОВ В ИМИТАЦИОННЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ИГРАХ ЕРЕШКО Ф.И. ....	152
ПРОБЛЕМА КОДИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ АКТИВНЫМИ АГЕНТАМИ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ ЖИЛЯКОВА Л.Ю. ....	163
ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ СЕТЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ С МОДУЛЯРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ, ГЕТЕРОГЕННЫМИ АГЕНТАМИ И РАНЖИРОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ КОЗИЦИН И.В. ....	168
ЗАДАЧА СТИМУЛИРОВАНИЯ В РЕФЛЕКСИВНОЙ ИГРЕ С ТОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ИНФОРМИРОВАННОСТИ ПЕТРОВ И.В., ЧХАРТИШВИЛИ А.Г. ....	171
<b>Дополнительные материалы</b>	
САМАРСКАЯ ШКОЛА ТАС ГЕРАСЬКИН М.И. ....	176
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ РИТЕЙЛЕРА И ПОСТАВЩИКА ПРИ СТЕПЕННЫХ ФУНКЦИЯХ СПРОСА И ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЯХ ИЗДЕРЖЕК ГОРОХОВ Д.Ю. ....	197

**СЕКЦИЯ 1.**

**Прикладные задачи ТАС**

# ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОИСКА РАВНОВЕСИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

**Акинфиев В. К.**

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

*akinf.valery@yandex.ru*

*Аннотация. Рассматриваются модели и методы анализа и поиска равновесия в активных системах, основанных на рыночных взаимодействиях игроков, в которых каждый игрок выбирает стратегию в рамках некоторой задачи оптимизации. Описывается общая схема сведения исходной задачи к решению смешанной задачи дополненности (МСП) и даются приметы решения прикладных задач.*

*Ключевые слова: активная система, модели оптимизации, равновесие Нэша, смешанная задача дополненности.*

## **Введение**

Теория активных систем (ТАС) базируется на наличии активных элементов или агентов, обладающих некоторой свободой в выборе своих решения или стратегий. За 55 лет своего развития ТАС превратилось в мощное научное направление исследований таких систем, в котором получены многочисленные теоретические и прикладные результаты, опубликованные в большом количестве книг и научных статей [1-3]. Активная система (АС) в ТАС представляет собой модель организационной системы, которая в существенной степени учитывает наличие несовпадающих интересов у субъектов управления (агентов) и их активное поведение. Агенты предоставляют информацию управляющему органу (центру), а выбор действий осуществляют исходя из собственных интересов. Основной акцент в ТАС делается на изучении иерархических систем, в которых, в простейшем случае, присутствует управляющий центр и множество управляемых агентов АС.

Заметим, что ТАС на начальном этапе своего развития ориентировалась на плановую экономику, которая в то время являлась объектом исследования многих экономистов и математиков. В дальнейшем было понята фундаментальная связь ТАС с теорией игр. В соответствии с подходами теории активных систем центр играет роль управляющего органа, агент – роль управляемого субъекта [1, 2].

С появлением в России экономики, частично основанной на рыночных принципах, появились новые прикладные задачи исследования АС, в которых роль управляющего центра выполняют механизмы рыночной конкуренции агентов, например, производителей и потребителей товаров или услуг. Причем, игроки могут быть различных типов, включая и правительственные структуры, которые могут также влиять на поведение остальных игроков. Цель стратегии игроков, по-прежнему, состоит в максимизации собственной функции полезности. Цель применения математических моделей таких систем заключается в анализе и поиске равновесных стратегий игроков, например, с точки зрения равновесия Нэша.

В докладе рассматривается задача поиска равновесия в системе, основанном на рыночных взаимодействиях игроков, в которой каждый игрок выбирает стратегию в рамках некоторой задачи оптимизации (задачи математического программирования). Важной особенностью такой постановки является то, что задачи оптимизации игроков взаимосвязаны через общие искомые переменные. В разделе 2 описывается общий подход к решению таких задач. В разделе 3 приведены формулировки двух прикладных задач, использующих описанный подход.

В 3.1 рассмотрена задача пространственного развития производственно-транспортных систем с учетом факторов конкуренции и рыночного ценообразования. В состав ПТС входят некоторый набор производственных элементов (предприятий) и транспортная инфраструктура, которая связывает производственные элементы с узлами потребления (рынками). В этом случае предполагается, что координация в системе отсутствует, и согласование инвестиционных программ развитие элементов ПТС реализуется через рыночные механизмы. В работе задача выбора стратегического поведения производственных и транспортных элементов ПТС на конкурентных рынках формулируется как совокупность взаимосвязанных нелинейных задач оптимизации со связанными переменными. Для их решения используются методы сведения исходной задачи к решению смешанной задачи дополненности (МСП) [4].

В 3.2 рассмотрена задача анализа распределенной сети генерации и потребления электроэнергии, в которой учитывается плата за выбросы CO<sub>2</sub>. Моделируется поведение трех игроков: генерирующих компаний, потребителей электроэнергии и сетевой компании. Данный подход основан на явном описании поведения различных агентов, каждый из которых сталкивается со своей проблемой оптимизации

(генерирующие компании стремятся максимизировать свою прибыль, а потребители стремятся максимизировать излишек потребителя (CS)).

Здесь мы не приводим выкладки, связанные с преобразованием исходных задач оптимизации агентов к задаче МСР. Полный текст можно найти в [4-6, 12].

## Общий подход к решению

Общий подход к решению задач данного типа состоит в следующем [7, 8]. Предположим, что есть  $N$  игроков ( $i=1\dots N$ ), каждый из которых пытается оптимизировать свое решение, например, максимизировать прибыль или минимизировать затраты. Пусть игрок  $i$  управляет переменными  $x_i$  в векторе  $x$ , тогда задача игрока  $i$  формулируется следующим образом:

$$\max_{x_i} f_i(x), \quad (1)$$

$$g_i(x_i) \leq 0; \lambda_i, \quad (2)$$

$$-x_i \leq 0; \beta_i, \quad (3)$$

где  $x_i \in R^{n_i}$  – вектор переменных решения,  $f_i: R^n \rightarrow R$  – целевая функция; ограничение (2) определяет  $g_i: R^{n_i} \rightarrow R^{m_i}$  и связанную с ним двойственную переменную  $\lambda_i \in R^{m_i}$ . Ограничение (3) налагает условие неотрицательности  $x_i \in R^{n_i}$ , с ним связана двойственная переменная  $\beta_i \in R^{n_i}$ . Мы предполагаем, что целевая функция (1) зависит от вектора  $x_i \in R^{n_i}$ , который включает вектор решений  $x_i \in R^{n_i}$ , а также векторы решений других игроков, т.е.  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ .

Предполагаем, что функции  $f_i(x)$  и  $g_i(x)$  непрерывно дифференцируемы, тогда мы можем написать условия Каруша – Куна – Таккера (ККТ) [8], связанные с задачей (1)–(3):

$$\nabla_{x_i} f_i(x) + \lambda_i^T \nabla g_i(x_i) - \beta_i = 0, \quad (4)$$

$$0 \leq -g_i(x_i) \perp \lambda_i \geq 0, \quad (5)$$

$$0 \leq x_i \perp \beta_i \geq 0. \quad (6)$$

Здесь под записью  $\nabla_{x_i} f_i(x)$  и  $\nabla g_i(x_i)$  понимается производная первого порядка функций  $f_i(x)$  и  $g_i(x_i)$  по переменной  $x_i$ , под записью  $\perp$  понимается условие дополняющей нежесткости, которое означает, что по крайней мере одно из неравенств в каждой строке условий ККТ должно быть выполнено как равенство,  $\lambda_i$  и  $\beta_i$  являются множителями Лагранжа.

Уравнение (4) получается в результате дифференцирования функции Лагранжа для задачи (1)–(3) по  $x_i \in R^{n_i}$ . Ограничения (5) и (6) являются условиями дополняющей нежесткости, полученными из ограничений (2) и (3) соответственно. Задача (4)–(6) может быть классифицирована как смешанная задача дополнителности (МСР), поскольку включает в себя условия равенства (4) и условия дополняющей нежесткости (5) и (6).

Мы можем объединить уравнения (4) и (6), чтобы исключить двойственную переменную  $\beta_i$ , тогда задача (4)–(6) запишется в более компактной форме:

$$0 \leq x_i \perp (\nabla_{x_i} f_i(x) + \lambda_i^T \nabla g_i(x_i)) \geq 0, \quad (7)$$

$$0 \leq -g_i(x_i) \perp \lambda_i \geq 0. \quad (8)$$

Важно отметить, что если  $f_i(x)$  и  $g_i(x)$  выпуклые функции, то условия ККТ (7)–(8) являются необходимыми и достаточными условиями оптимальности, так что решение система (7)–(8) эквивалентно решению оптимизационной задачи (1)–(3). Заметим, что во всех задачах, рассматриваемых далее, эти условия также выполняются.

Рассмотрим теоретико-игровую структуру, в которой все игроки  $i=1\dots N$  стремятся одновременно максимизировать свои целевые функции, решая задачи оптимизации (1)–(3). Эти задачи взаимосвязаны, поскольку выбор стратегии каждым игроком  $x_i$  влияет на целевые функции других игроков  $f_i(x)$ . В этом случае равновесие Нэша определяется как набор стратегий  $x_i$ , гарантирующих, что ни один игрок не сможет улучшить свою целевую функцию, изменив свою стратегию в одностороннем порядке. Следовательно, равновесие Нэша можно идентифицировать как совместное решение систем (7)–(8) для всех игроков одновременно. Заметим, что во многих практически важных случаях условия ККТ являются достаточными, например, для линейных и выпуклых квадратичных задач оптимизации. Если в задачах оптимизации игроков используются несколько различных переменных, то условия ККТ записываются для каждой переменной и объединяются в общую смешанную задачу дополнителности (МСР).

## Некоторые прикладные задачи

### 3.1 Выбор инвестиционных стратегии компаний на конкурентных рынках.

Рассматривается производственно-транспортная система, которая включает несколько локальных рынков потребления ( $j=1, J$ ), географически разделенных между собой, и  $N$  независимых компаний ( $j=1, N$ ), производящих продукцию и поставляющих ее на рынки [4]. В задаче необходимо учитывать пространственную структуру рынков, т.е. регионы спроса и предложения географически могут быть

разделены, а участники рынка несут транспортные расходы, зависящие от расстояния и способа доставки продукции.

Мы рассматриваем задачу в динамической постановке. Прогнозный горизонт равен  $T$  периодов,  $t=1, T$ . Пусть  $D_{jt}$  – рыночный спрос на продукцию на рынке  $j$ ,  $P_{jt}$  – рыночная цена в период  $t$ ,  $S_{jt}$  – суммарное предложение (объем поставок продукции) со стороны компаний-производителей на рынок  $j$ .

Рыночная цена продукции  $P_{jt}$  на каждом локальном рынке описывается обратной функцией спроса  $P_{jt}=a_{jt}-b_{jt}S_{jt}$ , где  $a_{jt}$  и  $b_{jt}$  являются функциями, описывающими особенности каждого рынка и изменение его емкости во времени. В данной модели предполагается, что спрос на продукцию со стороны потребителей  $D_{jt}$  зависит от ее цены, которая определяется предложением продукции со стороны компаний-производителей  $S_{jt}$ .

Искомые переменные:  $x_{ijt}$  – объем поставок продукции компанией  $i$  на рынок  $j$ . Тогда суммарный объем поставок на рынок  $S_{jt}=x_{ijt}+x_{-ijt}$ , где  $x_{-ijt}$  – суммарный объем поставок другими компаниями.

Производственные и транспортные издержки компании  $C_{it}$  зависят от общего объема производства продукции и объема ее поставки на рынки и равны  $C_{it} = \sum_{j=1}^J x_{ijt} \cdot c_{ijt} + c_{it} \cdot \sum_{j=1}^J x_{ijt}$ , где  $c_{it}$  – удельные производственные издержки, а  $c_{ijt}$  – удельные транспортные издержки.

Максимальный объем производства и поставок продукции компании  $i$  ограничены производственной мощностью предприятий, входящих в компанию. Для увеличения производства и поставок продукции и покрытия растущей емкости рынков компаниям необходимо инвестировать в развитие своих производственных мощностей в соответствии с некоторой инвестиционной стратегией, которая является также искомой переменной задачи.

Инвестиционная стратегия:  $y_{it}$  – прирост производственной мощности компании  $i$  в период  $t$ , связанный с инвестициями в расширение производства. Тогда  $I_{it}=k_i y_{i,t+\tau_i}$  – объем инвестиций в период  $t$ , необходимый для увеличения мощности производства, где  $\tau_i$  – временной лаг между периодом инвестирования и периодом прироста мощности производства.

Каждая компания стремится максимизировать свой суммарный чистый денежный поток за прогнозный период  $t=1, T$ , который равен чистой прибыли, полученной за этот период, за вычетом средств, направленных на инвестиции. Задача выбора искомых переменных стратегического поведения компании  $i$  сводится к поиску решения следующей задачи оптимизации:

$$\max_{x_{it}, y_{it}} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J ((a_{jt} - b_{jt} \cdot (x_{ijt} + x_{-ijt})) \cdot x_{ijt} - c_{ijt} \cdot x_{ijt} - c_{it} \cdot \sum_{j=1}^J x_{ijt} - k_i \cdot y_{i,t+\tau_i}), \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ijt} \leq C_{i0} + \sum_{t=1}^t y_{it} \quad \forall t, \quad (10)$$

$$y_{it} \leq y_{it}^{max} \quad \forall t, \quad (11)$$

$$x_{ijt} \geq 0, y_{it} \geq 0 \quad \forall t \text{ и } j. \quad (12)$$

где  $C_{i0}$  – мощность производства на начало прогнозного периода. Неравенство (10) задает технологическое ограничение на объем производства продукции, а неравенство (11) – на прирост мощности производства. Здесь  $y_{it}^{max}$  – максимально технологически возможный прирост мощности производства в период  $t$ .

Особенность задачи (9)–(12) состоит в том, что целевая функция (8) для компании  $i$  зависит не только выбора «своих» переменных, но и от выбора искомых переменных другими компаниями-конкурентами.

Совместное решение задач (9)–(12) для всех компаний сводится к игре, в которой выбор искомых переменных должен удовлетворять некоторым условиям равновесия. Для поиска рыночного равновесия используется концепция равновесия Нэша. Решение называется равновесным, если ни одна из компаний не может увеличить выигрыш (9), изменив свое решение в одностороннем порядке, не вызвав при этом реакцию других игроков. Проблема поиска равновесных точек Нэша в такой постановке сводится к совместному решению совокупности нелинейных задач оптимизации (9)–(12), которая относится к классу задач математического программирования с равновесными ограничениями (МРЕС). С



использованием подхода, описанного выше, она может быть сведена к задаче МСР, для которой существуют эффективные алгоритмы решения [5].

### 3.2 Моделирование стратегии электрогенерирующих компаний с учетом платы за выбросы CO2

Рассмотрим задачу анализа и моделирования распределенной системы генерации и потребления электроэнергии, в которой моделируется поведение трех игроков: генерирующих компаний, потребителей электроэнергии и сетевой компании [6].

Используемые обозначения:  $i \in I$  - множество генерирующих компаний,  $n, m \in N$  множество узлов сети,  $l \in L$  - линии электропередач, соединяющие узлы и принадлежащие сетевой компании (рис. 1).

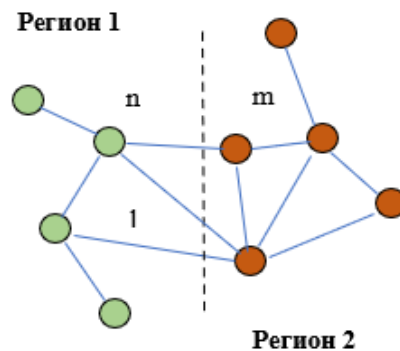


Рис 1. Граф системы генерации и потребления электроэнергии

Каждая генерирующая компания владеет несколькими генерирующими мощностями (электростанциями), расположенными в разных узлах сети. Мощность генерации  $i$ -ой генерирующей компании в узле  $n$  равна  $cap_{i,n}$  и считается фиксированной. В этих условиях компании принимают решение, как эксплуатировать принадлежащие им генерирующие мощности в течение каждого периода  $t$ .

Искомые переменные:  $x_{i,n,t}$  – мощность, произведенная компанией  $i$  в узле  $n$  за период  $t$  и  $s_{i,m,t}$  – мощность, проданная компанией  $i$  в узле  $m$  за период  $t$ .

Каждая генерирующая мощность характеризуется своими удельными издержками производства электроэнергии  $C_{i,n}$  и уровнем удельных выбросов CO2, зависящих от используемой технологии генерации. Где  $E_{i,n}$  -углеродоемкость генерации компании  $i$  в узле  $n$ . Пусть  $R_n$  - стоимость разрешений на выбросы CO2 в узле  $n$ . Тогда плата за выбросы для компании в период равна  $t \sum_{n=1}^N x_{i,n,t} E_{i,n} R_n$ . Мы здесь предполагаем, что в разных узлах сети местные власти могут назначать различные стоимости разрешений на выбросы CO2. Рассмотрим для простоты случай, когда узлы сети делятся на два подмножества, в первом плата за выбросы одинакова и равна  $R$ , во втором равна нулю, то есть плата за выбросы CO2 не взимается. Для этого вводится двоичный параметр  $B_n$  равный 1, если узел  $n$  относится к первому подмножеству, и 0 в противном случае.

Целью каждой генерирующей компании является выбор переменных  $x_{i,n,t}$  и  $s_{i,m,t}$ , которые максимизируют прибыль компании с учетом ограничений, связанных с фиксированной мощностью генерации, балансом электроэнергии в сети и не отрицательностью искомых переменных.

Потребители представлены обратной функцией спроса в каждом узле, которую можно рассматривать как результат решения их задач максимизации полезности:

$$P_{m,t} = a_{m,t} - b_{m,t} \sum_{i=1}^I s_{i,m,t} \quad (12)$$

Здесь  $\sum_{i=1}^I s_{i,m,t}$  - электроэнергия, продаваемая всеми компаниями в узле  $m$ ,  $a_{m,t}$  и  $b_{m,t}$  заданные параметры, характеризующие функцию спроса потребителей в узле  $m$ .

Прибыль сетевой компании, которая является посредником в передаче электрической мощности между генерирующими компаниями и потребителями, обеспечивается за счет взимания платы за передачу электроэнергии по сети. В некотором смысле она решает задачу оптимального распределения и балансировки потоков электроэнергии с учетом ограничений на пропускную способность линии электропередач и балансов в узлах.

В задаче учитывает рыночное взаимодействие генерирующих компаний и компании, которая является оператором сети (сетевая компания). Предполагается, что тарифы на передачу электроэнергии по сети

также являются результатом рыночного равновесия и зависят от совместного решения задач оптимизации генерирующих компаний и сетевой компании.

Как и ранее, задача МСР задается набором уравнений, представляющих условия ККТ для соответствующих вариантов задач оптимизации агентов рынка, а также условия баланса в узлах сети. Описание задач оптимизации агентов рынка и технология их преобразования в МСР в приведено в [5].

Рассмотрение неоднородной сети генерации позволяет моделировать различные эффекты, связанные с изменением поведения генерирующих компаний в зависимости от цены разрешений на выбросы CO<sub>2</sub> в различных регионах. В частности, высокая цена разрешений на выбросы в некотором регионе увеличивает предельные затраты на генерацию и, соответственно, приводит к высокой цене на электроэнергию на этом локальном рынке. Это стимулирует производителей, расположенных в регионах с низкой или с нулевой ценой разрешений на выбросы, увеличивать производство электроэнергии с целью экспорта ее в регулируемую зону, тем самым вызывая «утечку углерода». Данный подход может быть использован для анализа механизмов введения трансграничного налога для сокращения эффекта «утечку углерода» в регионы с жестким углеродным регулированием.

## Заключение

Рассмотренные в докладе задачи и методы являются перспективным направлением анализа АС в социально-экономических системах и, по мнению автора, могут внести вклад в дальнейшем развитии ТАС. Модели комплементарности, в том числе задачи МСР, используются для поиска условий равновесия, поскольку они дают возможность рассматривать одновременно задачи оптимизации нескольких взаимодействующих игроков.

Следует отметить, что данный подход к решению задач поиска рыночного равновесия в задаче выбора стратегического поведения компаний оказался весьма плодотворным и породил разработку разнообразных методов и их применение к решению ряда прикладных задач, в том числе для моделирования либерализованных рынков электроэнергии, глобальных рынков нефти, природного газа, металлургического угля и др. [7-12].

Различные предположения о конкурентном поведении или типах взаимодействий игроков приводят к разным модельным структурам. Таким образом, модели комплементарности достаточно универсальны и могут охватывать многие аспекты теории игр и оптимизации в экономике.

## Литература

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. — М.: СИНТЕГ, 1999.
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — 2-е изд. — М.: Физматлит, 2007. — 584 с.
3. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем (история развития) // Проблемы управления. 2009. № 3.1. С. 29 – 35.
4. Акинфиев В.К. Два подхода к решению динамической задачи расширения мощности производства на рынке олигополии // Управление большими системами. 2019. Выпуск 79. С. 65-85.
5. Акинфиев В.К. Модели пространственного развития инфраструктурных систем // Управление большими системами. 2021. Выпуск 91. С. 96-119.
6. Акинфиев В.К. Выбор инвестиционных решений электрогенерирующих компаний с учетом платы за выбросы CO<sub>2</sub> / Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2022). М.: ИПУ РАН, 2022. С. 100-105.
7. Gabriel, S. A. and Leuthold, F. U. Solving discretely-constrained MPEC problems with applications in electric power markets. // Energy Economics. — 2010. —32(1). — P.3–14.
8. Wogrin S. et al. Open versus closed loop capacity equilibria in electricity markets under perfect and oligopolistic competition // Mathematical Programming. - 2013. - Vol. 140(2). - P. 295-322.
9. Li, C., Conejo, A. J., Liu, P., et al. Mixed-integer linear programming models and algorithms for generation and transmission expansion planning of power systems. // European Journal of Operational Research, 2022. 297(3). — P. 1071-1082.
10. Limpitton, T., Chen, Y., and Oren, S. S. The impact of imperfect competition in emission permits trading on oligopolistic electricity markets. // The Energy Journal, 2014, 35(3). — P.145–166.
11. Ruiz C. et al. A tutorial review of complementarity models for decision-making in energy markets // EURO Journal on Decision Processes. - 2014. - Vol. 2, No. 1-2. - P. 91-120.
12. Akinfiev V.K. Dynamic Capacity Expansion Problem in Competitive Markets // Proc. of the 12th Int. Conf. "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). - Moscow: IEEE, 2019.

# РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СРОКОВ ВЫПОЛНЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ И ФЕДЕРАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ<sup>1</sup>

Албычев А.С., Червяков А.А.,

Федеральное Казначейство Российской Федерации, Москва, Россия  
albychev@mirea.ru, achervyakov@roskazna.ru

Никульчев Е.В., Ильин Д.Ю., Газанова Н.Ш.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия  
nikulchev@mirea.ru, i@dmitryilin.com, gazanova@mirea.ru

*Аннотация. Доклад посвящен разработке специализированных интеллектуальных инструментов, обеспечивающих информационную поддержку организационно-технических структур контроля выполнения национальных и федеральных проектов. Сформировано признаковое пространство и построены модели прогнозирования отставания в сроках выполнения проектов по контрольным точкам и разработана процедура опережающего оповещения.*

*Ключевые слова: национальные проекты, организационно-технические системы, контрольные точки проектов, интеллектуальные инструменты.*

## Введение

Важным направлением теории активных систем является теория управления организационными системами [1, 2], в которой сформулированы специализированные исследовательские принципы [3], заключающиеся в использовании, наряду с классическими системными методами и моделями, принципов функционирования живых и социальных систем. Использование в качестве инструмента моделирования и управления современных интеллектуальных систем, основанных на машинном обучении, дает возможность разработки инструментов, позволяющих учитывать специфику организационных активных систем. Модели, основанные на обучении по историческим данным, способны выявить человеческий фактор, скрытые цели активных подсистем и другие, плохо формализуемые явления, существенно влияющие на исследуемые процессы.

Управление проектами рассматривалась с позиций теории активных систем [4], демонстрируя эффективность данного подхода.

В настоящем докладе рассматривается задача мониторинга хода выполнения национальных и федеральных проектов (НП и ФП). Мониторинг хода их выполнения осуществляется в рамках Государственной автоматизированной информационной системы «Управление» (ГАС «Управление», далее — ГАСУ), которая представляет собой «единую государственную информационную систему, обеспечивающую сбор, учет, обработку и анализ данных, содержащихся в государственных и муниципальных информационных ресурсах, аналитических данных, данных официальной государственной статистики, а также иных сведений, необходимых для обеспечения поддержки принятия управленческих решений в сфере государственного управления и управления Национальными проектами» [5]. Закрытая часть портала ГАСУ предназначена для работы сотрудников органов государственной власти и органов местного самоуправления. Ход и результаты выполнения НП и ФП оценивается по контрольным точкам (КТ).

Цель исследования – сформировать инструменты для моделирования и прогнозирования хода выполнения НП и ФП на основе машинного обучения по историческим данным, имеющимся в системе.

## 1. Контроль сроков выполнения национальных и федеральных проектов по контрольным точкам

В качестве исходных данных используются данные ГАСУ, которые обезличены и пронормированы для проведения исследований и построения интеллектуальных инструментов.

В ГАСУ, в информационную подсистему «Федерация» входят:

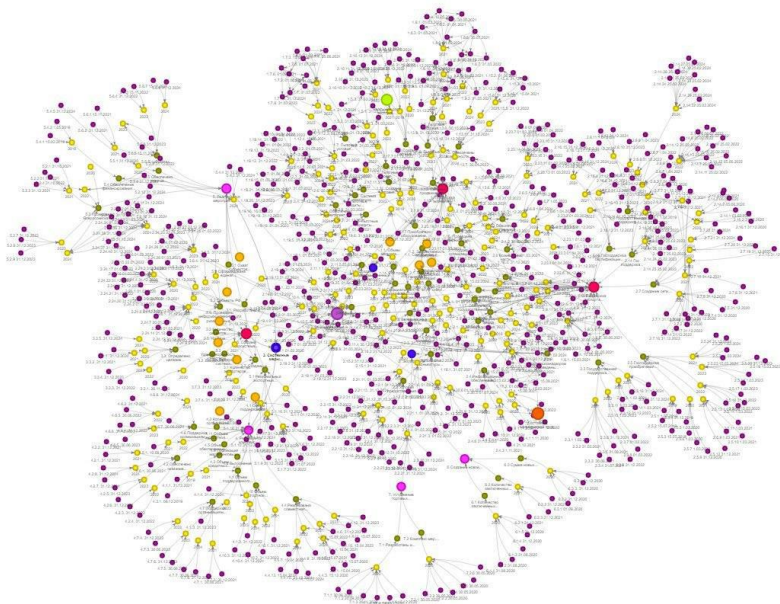
---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания на 2024 год паспорта № 5560-24 по научно-методическому и ресурсному обеспечению системы образования на тему: «Научно-методическое обеспечение работ по анализу деятельности управления общественными финансами Российской Федерации с применением искусственного интеллекта»

- модуль сбора и обработки данных;
- единого хранилища данных;
- СВПО – система ведомственных проектных офисов.

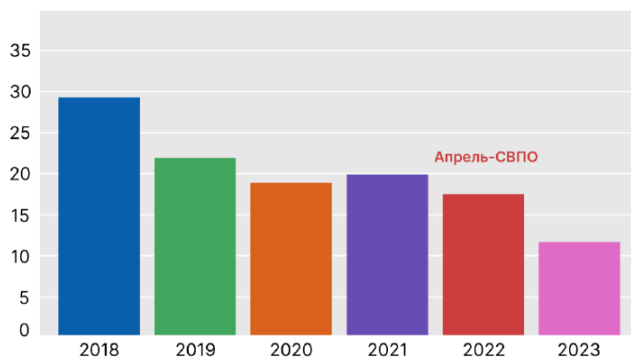
Таким образом, в ГАСУ хранятся все финансовые и натуральные показатели НП и ФП, а также информация паспортов проектов: ключевые показатели, методы расчета уровней достижения ключевых показателей, мероприятия и их контрольные точки.

На рис 1. показано графовое представление контрольных точек одного из НП. Каждая фиолетовая точка – это контрольная точка текущего года, жёлтые точки, агрегирующие фиолетовые, соответственно, отдельные годы реализации НП.



*Рис. 1. Графовое представление проектов в ГАСУ*

Важным компонентом организационно-технического управления является система ведомственных проектных офисов (СВПО), представляющую собой систему инцидент-менеджмента в ГАСУ. Здесь под инцидентом понимается опоздание сроков выполнения соответствующих КТ проектов, которые могут быть вызваны как объективными, так и субъективными факторами, связанные с деятельностью конкретных исполнителей, ответственных за заполнение данных в информационных системах. Мерой реагирования СВПО, ответственного за реализацию конкретного проекта, является выполнение следующей последовательности действий: составление отчета о причинах, приведших к опозданию и предпринимаемым действиях по закрытию КТ; реализация работ по закрытию КТ; при необходимости формирование запроса на изменение в НП и ФП, касающейся сроков и/или параметров этой КТ и/или связанных проектов. Внедрение СВПО в апреле 2022 года, позволило уменьшить количество опозданий по КТ. На рис. 2 показан процент КТ, закрытых с нарушением сроков выполнения, необходимо отметить, что до внедрения организационно-технического сопровождения СВПО более 20% КТ выполнялись с опозданием.



*Рис. 2. Процент опозданий выполнения контрольных точек проектов по годам выполнения*

Однако из рис. 2 видно, что остается еще около 13% КТ выполняются с опозданием. Соответственно, помимо инцидентов «просроченная КТ», необходимо разработать предупредительные индикаторы риска просрочки контрольных точек и, до реализации риска просрочки, направлять их в проектные офисы,

чтобы те выполнили предупреждающие просрочку действия. Непосредственная связка выявленного риска и предлагаемой для назначения пользователю меры реагирования в автоматическом режиме может базироваться на причинах формирования риска, выявленных негативных фактах, вероятности наступления негативного последствия и признаках ее эффективности на основе ретроспективных данных.

Таким образом, необходимо сформировать интеллектуальные инструменты, основанные на машинном обучении по имеющимся в ГАСУ данным, способные выявлять потенциально опаздывающие КТ проектов и предоставлять информацию соответствующим проектным офисам.

## 2. Интеллектуальные инструменты прогнозирования и контроля

Для обучения моделей был использован набор данных по КТ НП и ФП за 2022, 2023 и часть 2024 года. Данные за 2022 и 2023 год использовались для обучения и тестирования модели, данные 2024 года – для проверки применимости модели на новых данных. Набор данных с данными за период 2022–2023 годы был разделен на обучающую и тестовую части (20% записей).

На основе анализа данных, сформировано признаковое пространство, характеризующие КТ проектов. Список признаков приведен в табл. 1.

Таблица 1. Элементы признакового пространства

№	Признак	Тип
1.	Национальный проект	Номинальный
2.	Федеральный проект	Номинальный
3.	Федеральный орган исполнительной власти, ответственный за НП	Номинальный
4.	Федеральный орган исполнительной власти, ответственный за ФП	Номинальный
5.	Тип результата КТ	Номинальный
6.	Тип КТ	Номинальный
7.	Наименование типа КТ	Номинальный
8.	Идентификатор Федерального органа исполнительной власти	Номинальный
9.	Месяц окончания работ по КТ	Номинальный
10.	День окончания работ по КТ в пределах месяца	Номинальный
11.	День недели окончания работ по КТ	Номинальный
12.	КТ обеспечена финансированием	Бинарный
13.	КТ реализуется регионами	Бинарный

Задача машинного обучения состоит в том, что по полученному признаковому пространству сформировать ансамбль интеллектуальных методов классификации, позволяющий относить КТ в классы потенциально опаздывающих по срокам выполнения или выполняемых в заданные сроки.

Поскольку, в системе в дополнение к бинарным признакам имеются категориальные признаки, предварительная обработка состояла из кодирования категориальных признаков с помощью OneHotEncoder с отбрасыванием первой категории в признаке. В связи с несбалансированностью набора данных по классам применялся оверсемплинг методом синтетической выборки меньшинства для номиналов (SMOTEN).

Рассматривались следующие методы классификации:

1. Классификатор на основе дерева решений (DT).
2. Классификация на основе опорных векторов (SVM).
3. Классификатор на основе случайного леса (RF).
4. Классификатор, реализующий голосование по k-ближайшим соседям (KNN).
5. Линейный классификатор с обучением методом стохастического градиентного спуска (SGD с модифицированной функцией потерь Хьюбера).
6. Классификатор логистической регрессии (LR).
7. Классификатор AdaBoost (AB).
8. Ансамбль классификаторов с использованием мягкого голосования, включающий все вышеперечисленные методы (VC).

Для всех методов использовались параметры по умолчанию, предоставленные Scikit-learn версии 1.5.1. Для методов, где веса классов были применимыми, использовался подход с автоматическим расчетом весов классов на основе их доли в данных.

Результаты классификации показаны в табл. 2. Тестирование на данных 2024 года показывает оценки качества моделей сравнимые с полученными при тестировании на данных, соответствующих годам обучающей выборки.

Таблица 2. Показатели качества применения интеллектуальных методов классификации

Метод	Тестовые данные за 2022–2023 годы			Данные за 2024 год		
	Точность	Полнота	F1	Точность	Полнота	F1
DT	0.89	0.84	0.87	0.50	0.78	0.61
SVM	0.94	0.78	0.91	0.58	0.79	0.67
RF	0.96	0.91	0.93	0.60	0.80	0.68
KNN	0.89	0.89	0.89	0.57	0.88	0.69
SGD	0.88	0.79	0.83	0.52	0.70	0.60
LR	0.83	0.85	0.84	0.50	0.77	0.60
AB	0.80	0.84	0.82	0.45	0.77	0.57
VC	0.93	0.89	0.91	0.60	0.85	0.71

Таким образом, полученный ансамбль методов позволяет решить задачу выявления потенциально просроченных КТ НП и ФП.

### 3. Внедрение результатов

Результаты, полученные с использованием разработанных инструментов, предназначены для использования в федеральной системе [6]. На рис. 3 представлен алгоритм рассылки индикаторов в соответствующие проектные офисы НП и ФП. Желтый индикатор предупреждает о просрочке КТ.

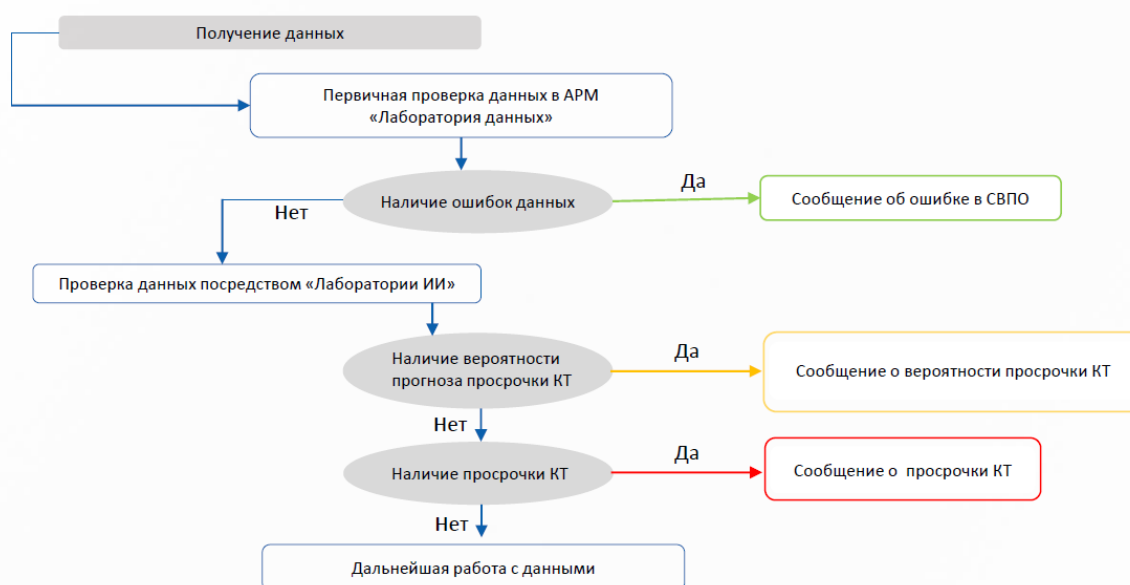


Рис. 3. Процедура опережающего оповещения о возможных задержках в сроках выполнения КТ

Результаты использования на фактических данных текущего года, позволили получить следующие результаты. Здесь учитывалось, что незначительные опоздания могут быть пропущены.

На рис. 4 приведены количественные показатели:

1. Правильно предсказанных моделью КТ, завершенных в срок – 901;
2. Предсказанных как потенциально возможных опозданий, но завершившихся в срок – 129;
3. Не выявленных моделью опозданий – 12;
4. Выявленных опозданий, которые действительно не были выполнены в срок – 194.

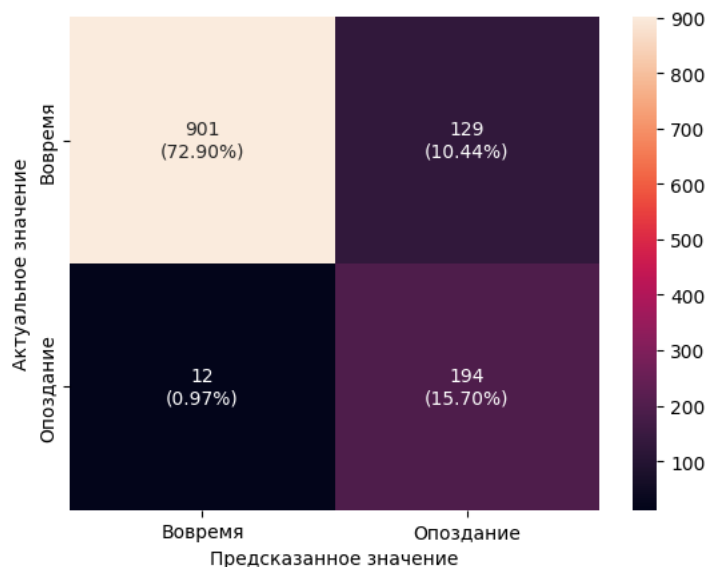


Рис. 4. Матрица с результатами работы ансамбля классификаторов

Таким образом, построенный ансамбль интеллектуальных моделей является эффективным инструментом выявления потенциально задерживающих сроков выполнения контрольных точек и формирования соответствующих индикаторов для проектных офисов НП и ФП.

#### 4. Заключение

В докладе разработаны специализированные интеллектуальные инструменты, обеспечивающие информационную поддержку организационно-технических структур контроля хода выполнения национальных и федеральных проектов. В качестве инструмента моделирования использовались интеллектуальные методы классификации. Результатом проведенного исследования является сформированный ансамбль интеллектуальных моделей, позволяющий на основе данных признаков пространства выявлять потенциальное опоздание в сроках выполнения контрольных точек национальных и федеральных проектов. Разработана процедура опережающего оповещения систему проектных офисов, отвечающих за проекты. Проведенный анализ результатов позволяет сделать вывод об эффективности предложенных решений.

#### Литература

1. Белов М.В., Новиков Д.А. Управление жизненными циклами организационно-технических систем. – М.: ЛЕНАНД, 2020.
2. Бурков В.Н., Губко М.В., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями // Проблемы управления. 2012. N 4. – С. 2–10.
3. Новиков Д.А. Исследовательские принципы теории управления организационно-техническими системами // Управление развитием крупномасштабных систем MLSД'2020: труды Тринадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 79–83.
4. Бурков В.Н., Цветков А.В., Сычев А.П. Механизмы стимулирования сокращения сроков реализации проектов при линейных функциях затрат // Управление большими системами: сборник трудов. 2009. Вып. 25. – С. 84–95.
5. ГАС «Управление» [Электронный ресурс] URL: <http://gasu.gov.ru/>
6. Албычев А.С. ИТ-приоритеты Казначейства России // Журнал Бюджет. 2023. N 6 (246). – С. 42–47.

# МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ОСНОВАННАЯ НА СЛУЧАЙНЫХ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССАХ

Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А.

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

barkalov@vgasu.vrn.ru, mail@moiseevs.ru, sea-parish@mail.ru

*Аннотация. Предлагается методика, которая дает возможность оценивать вероятность ликвидации возможных рисков на разных этапах их развития в разные моменты времени. Методика позволит прогнозировать время завершения различных стадий ликвидации рисков. В ее основе лежит теория марковских случайных процессов с непрерывным временем.*

*Ключевые слова: риски, управление, марковский случайный процесс, вероятность, математическое моделирование.*

## Введение

Процесс управления рисками играет важную роль в деятельности предприятий и организаций. Его основная цель – идентифицировать, оценивать и минимизировать риски, которые могут негативно повлиять на достижение целей организации. Система управления рисками предоставляет информацию, необходимую для принятия обоснованных решений. Это позволяет руководству лучше оценивать потенциальные угрозы и возможности. Идентификация рисков на ранней стадии помогает улучшить стратегическое и операционное планирование, делая его более реалистичным и безопасным.

Эффективные меры по управлению рисками помогают предотвратить или уменьшить возможные потери и убытки, связанные с реальными или потенциальными угрозами. Организации, использующие в своей деятельности методы управления рисками, становятся более устойчивыми к внешним и внутренним вызовам, что способствует их долгосрочной стабильности и успеху. Эффективное управление рисками способствует оптимизации бизнес-процессов, что может привести к повышению общей эффективности деятельности организации [1].

Все вышесказанное свидетельствует о том, что любые разработки, связанные с методами управления рисками актуальны и востребованы в настоящее время.

## 1. Постановка задачи

В данной работе ставится задача построить модель реализации различных этапов ликвидации возможных угроз с целью получения временных и вероятностных характеристик процесса управления рисками. Это позволит осуществлять прогнозы и оценки завершения различных этапов ликвидации угроз в заданное время и с заданной вероятностью.

Для решения данной задачи было решено использовать теорию марковских случайных процессов [2, 3]. Выбор для решения данной задачи указанного инструмента обусловлен следующим.

Многие процессы управления рисками характеризуются случайными изменениями, которые можно описать через вероятностные распределения. Марковские процессы позволяют эффективно моделировать такие ситуации. Марковские процессы хорошо подходят для задач, где можно дискретизировать время. Это важно в контексте управления рисками, так как многие финансовые и операционные процессы можно анализировать на основе временных интервалов.

Кроме того, марковские модели позволяют делать прогнозы о будущих состояниях системы и вероятности их достижения, что в общем и необходимо для поставленной задачи. Также марковские модели позволяют анализировать устойчивость систем к различным рискам, оценивать вероятности переходов в разные состояния и соответственно разрабатывать стратегии управления.

## 2. Математическая модель

Рассмотрим некоторый случайный процесс, который представляет собой последовательность действий, направленных на ликвидацию некоторой угрозы. Состояния данного процесса связаны с этапами и мероприятиями, направленными на устранение риска [4]. Введем для такого процесса следующие дискретные состояния:

$S_1$  – получена информация о некоторой угрозе, идет процесс ее идентификации, производится анализ рисков, оценка возможного ущерба;

$S_2$  – принимается решение о разработке стратегий реагирования на угрозу, возможны варианты реализации системы мероприятий для ликвидации угрозы (для критических рисков, вероятность их реализации обозначим через  $p_d$ ), либо необходимости в таких мероприятиях нет (для некритических рисков);

$S_3$  – реализуются мероприятия по реагированию на угрозу, направленные на минимизацию или устранению риска, в результате угроза может быть либо ликвидирована, либо указанные мероприятия не



приводят к ликвидации угрозы, необходим дополнительный сбор информации и разработка иных механизмов управления рисками (вероятность данного события обозначим через  $p_r$ );

$S_4$  – угроза ликвидирована.

Кроме этого, необходимо оценить ряд временных характеристик случайного процесса:

$T$  – средняя продолжительность состояния  $S_1$  от момента обнаружения угрозы до момента принятия решений о разработке стратегий реагирования на угрозу;

$T_d$  – средняя продолжительность состояния  $S_2$  от момента обнаружения угрозы до ее ликвидации или до начала реализации мероприятий по реагированию на угрозу и ее ликвидации;

$T_r$  – средняя продолжительность состояния  $S_3$  или средняя продолжительность мероприятий по ликвидации угрозы.

Для упрощения расчетов будем считать, что все вероятностные и временные параметры не зависят от времени и случайный процесс будет однородным. Однако, данный подход позволяет использовать и динамические параметры. В результате, получим граф состояний случайного процесса [2], который приведен на рисунке 1.

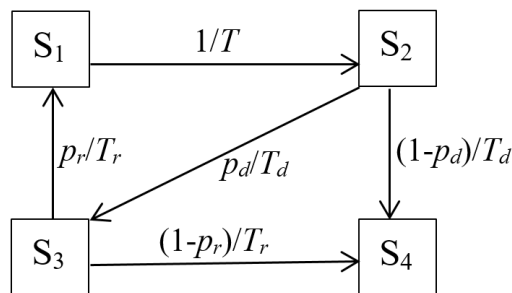


Рис. 1. Граф состояний случайного процесса

Введем вероятности состояний  $P_i(t)$  ( $i=1,2,3,4$ ), где каждое из них есть вероятность того, что в произвольный момент времени  $t$  случайный процесс находился в состоянии  $S_i$ . Для нахождения функций  $P_i(t)$  составляется система дифференциальных уравнений Колмогорова [3]:

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = \frac{p_r}{T_d} P_3(t) - \frac{P_1(t)}{T}; \\ \dot{P}_2(t) = \frac{P_1(t)}{T} - \frac{P_2(t)}{T_d}; \\ \dot{P}_3(t) = \frac{p_d P_2(t)}{T_d} - \frac{P_3(t)}{T_r}; \\ \dot{P}_4(t) = \frac{(1-p_r)P_2(t)}{T_r} + \frac{(1-p_d)P_2(t)}{T_d}. \end{cases} \quad (1)$$

Однако, система (1) является вырожденной, и для получения единственного решения нужно одно, например последнее уравнение заменить условием нормировки [2]:  $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1$ . В результате имеем систему:

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = \frac{p_r}{T_d} P_3(t) - \frac{P_1(t)}{T}; \\ \dot{P}_2(t) = \frac{P_1(t)}{T} - \frac{P_2(t)}{T_d}; \\ \dot{P}_3(t) = \frac{p_d P_2(t)}{T_d} - \frac{P_3(t)}{T_r}; \\ P_4(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) - P_3(t). \end{cases} \quad (2)$$

Учитывает то, что в начальный момент времени случайный процесс начинал свою эволюцию с состояния  $S_1$ , введем следующие начальные условия:

$$P_1(0) = 1; \quad P_2(0) = 0; \quad P_3(0) = 0; \quad P_4(0) = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим решение задачи (2) и (3).

### 3. Получение решения по модели и его анализ

Для решения задачи (2) и (3) и с целью сокращения обозначений при выводе полученных результатов, введем следующие обозначения:

$$\frac{P_r}{T_d} = a; \frac{1}{T} = b; \frac{1}{T_d} = c; \frac{P_d}{T_d} = d; \frac{1}{T_r} = e.$$

Тогда систему дифференциальных уравнений (2) можно представить в следующем более компактном виде:

$$\begin{cases} \dot{P}_1(t) = aP_3(t) - bP_1(t); \\ \dot{P}_2(t) = bP_1(t) - cP_2(t); \\ \dot{P}_3(t) = dP_2(t) - eP_3(t); \\ P_4(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) - P_3(t). \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы (4) с ограничениями (3) будем проводить с использованием интегрального преобразования Лапласа [5, 6]. В итоге приведем окончательное решение:

$$P_1(t) = (A_1 t + B_1) \exp(-t/T) + C_1 \exp(-t/T_r) + D_1 \exp(-t/T_d),$$

где

$$A_1 = \frac{abd}{(e-b)(c-e)}; B_1 = \frac{abd(b-c)}{(e-b)}; C_1 = \frac{abd}{(b-e)^2(c-e)}; D_1 = \frac{abd}{(b-c)^2(e-c)};$$

$$P_2(t) = \frac{T_d}{T_d - T} [\exp(-t/T) - \exp(-t/T_d)]; \quad P_3(t) = A_3 \exp(-t/T) + (B_3 + C_3) \exp(-t/T_d),$$

где

$$A_3 = \frac{db}{(c-e)(b-e)}; B_3 = \frac{db}{(e-c)(b-c)}; C_3 = \frac{db}{(e-b)(c-b)};$$

$$P_4(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) - P_3(t).$$

Для анализа полученного решения приведем на рисунке 2 качественные графики вероятностей состояний случайного процесса.

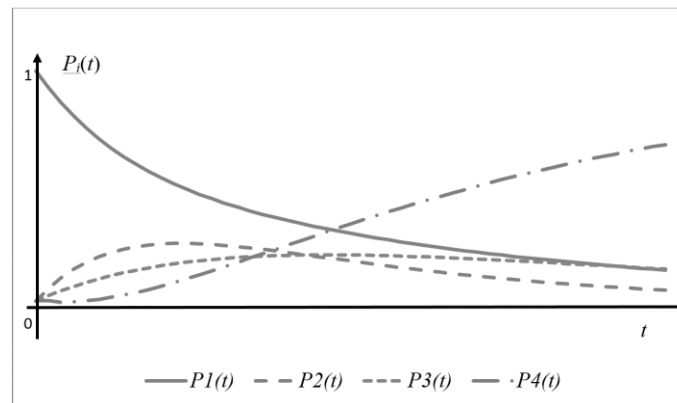


Рис. 2. Качественные зависимости вероятностей состояний от времени

Из рисунка 2 видно, что с течением времени вероятность обработки информации об угрозе уменьшается, как и следовало ожидать, а вероятность ликвидации угрозы растет, выходя со временем на единицу, то есть угроза или будет устранена, или она потеряет смысл. Динамика данных двух кривых обратно пропорциональна среднему времени пребывания в первом состоянии  $T$ . Графики вероятностей промежуточных этапов ликвидации угрозы  $S_2$  и  $S_3$  имеют максимум при интервалах времени порядка  $T_d$  и  $T_r$ . Максимум тем шире, чем больше данные интервалы времени.

#### 4. Заключение

В данной статье была попытка решения задачи описать методику моделирования процесса ликвидации или нивелирования негативных последствий от возникновения угроз для деятельности некоторого предприятия или организации. Для этих целей были выделены основные этапы ликвидации угрозы и на основе теории марковских случайных процессов была построена модель оценивания временных и вероятностных показателей результативности завершения каждого этапа. Данная методика позволит оценить вероятности завершения как промежуточных этапов процесса ликвидации угроз, так и успешного завершения всего процесса.

Предприятия и организации, внедрившие описанную методику в систему управления рисками и угрозами, смогут оценить временные характеристики окончания каждого этапа управления рисками с заданной вероятностью, а также рассчитать вероятность окончания каждого этапа за установленное время, что позволит оптимизировать процессы, связанные с возможностью заранее выявлять и предотвращать потенциальные угрозы, что позволит снизить количество негативных инцидентов. Кроме того, анализ данных о возможных рисках позволят принимать обоснованные решения и минимизировать негативные последствия.

Кроме вышесказанного, эффективное управление рисками на основе методов и моделей позволит избежать или уменьшить незапланированные расходы, связанные с ликвидацией влияния негативных воздействий или возможных угроз. Также следует учесть социальные факторы – клиенты и партнеры больше доверяют организациям, которые серьезно относятся к управлению рисками [7].

Таким образом, оптимизация процессов управления рисками может улучшить общую производительность и устойчивость организации в условиях динамически меняющихся условий.

## Литература

1. Баркалов С.А. Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel / С.А. Баркалов, С.И. Моисеев, В.Л. Порядина. - Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2015. – 265 с.
2. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 1998. – 354 с.
3. Матальцкий М.А. Элементы теории случайных процессов: учеб. пособие. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 326 с.
4. Тихомиров Н.П. Риск-анализ в экономике / Н.П. Тихомиров, Т.М. Тихомирова. – Москва: ЗАО «Издательство «Экономика», 2010. – 318 с.
5. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: МЦНМО, 2012. – 344 с.
6. Агафонов С.А. Дифференциальные уравнения. Вып. VIII. – М.: МГТУ, 2011. – 347 с.
7. Баркалов С.А. Динамическая модель разработки и реализации проекта под влиянием внешних факторов / С.А. Баркалов, А.Ю. Глушков, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 76–84.

# ПРОГНОЗНАЯ АНАЛИТИКА БОЛЬШИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Добронец Б.С., Попова О.А.

Сибирский Федеральный университет, Красноярск, Россия

*Аннотация.* В работе рассмотрены вопросы прогнозной аналитики больших временных рядов. На примере агрегирования и исследования данных по заработной плате и продолжительности жизни демонстрируется новый метод преобразования больших временных рядов во временные ряды распределений для анализа прогнозной динамики с целью получения дополнительных оснований в задачах принятия управленческих решений в социально-экономических системах.

*Ключевые слова:* прогнозная аналитика, большие временные ряды, агрегация, кусочно-полиномиальные модели, временные ряды распределений.

## Введение

В современных условиях функционирования и развития социально-экономических систем возникает острая необходимость использования современных методов прогнозной аналитики, позволяющих в условиях больших и сверх больших объемов неструктурированной информации, обладающей высокой степенью неопределенности, получать необходимые знания для принятия надежных, обоснованных управленческих решений. К таким данным можно отнести большие временные ряды.

Методы прогнозной аналитики фокусируются, прежде всего, на предсказании будущих событий, возможных траекторий поведения системы и их исходов. Этот подход задействует различные методы прикладной статистики, алгоритмы машинного обучения и сложное моделирование прогнозов, чтобы анализировать текущие и исторические данные. Основная цель, как правило, заключается в оценке вероятности возникновения различных событий, даже если эти события еще не стали объектом чье-либо внимания.

Основной особенностью процесса прогнозирования является его неопределенность. Важно отметить, что точность прогноза определяет его практическую ценность для управления, так как более точный прогноз позволяет принимать эффективные управленческие решения. Неопределенность больших временных рядов определяется рядом факторов и существенным образом может влиять на результат прогнозирования уже на первых этапах обработки. Например, объем информации, содержащийся в больших временных рядах, влечет порой излишнюю детализацию, высокую степень изменчивости, которая не позволяет выявить с необходимой достоверностью существующие тенденции. Подробные данные часто являются очень неустойчивыми из-за воздействия различных случайных факторов.

Известно, что во многих случаях полезно рассматривать большие данные в агрегированной форме. Важно иметь в виду, что использование таких процедур агрегирования, как усреднение, исключение экстремальных значений (эмиссия), процедура сглаживания может привести к потере важной информации. Поэтому выбор метода агрегирования является важной задачей, поскольку без предварительного исследования легко получить дополнительную неопределенность, которой нет в исходной постановке.

В статье рассматривается новый способ преобразования больших временных рядов, во временные ряды распределений. Важно отметить, что такой подход означает переход от методов, работающих с большими временными рядами, к временным рядам распределений.

Для преобразования могут использоваться различные математические модели. В статье предлагается использовать кусочно-полиномиальные модели. Частным примером кусочно-полиномиальных моделей является гистограмма, которая представляет собой кусочно-постоянную функцию. Отметим, что применение в качестве способа преобразования временного ряда в ряд распределений, гистограммной модели, уже позволяет существенно повысить точность вычисления за счет использования информации о частотном распределении данных вместо замены набора данных одним значением, например значением выборочного среднего или моды. Отметим, что гистограммные ряды распределений, обсуждаются, например, в работах [1,2].

Для обоснования данного подхода, определим временной ряд распределений, как последовательность плотностей вероятности, представленных в виде кусочно-полиномиальных функций. Использование кусочно-полиномиальных моделей обусловлено, прежде всего, тем, что они позволяют достаточно точно представлять произвольные распределения. Важно также отметить, что для выполнения численных операций над функциями плотности вероятности, представленными кусочно-полиномиальными переменными, существует развитая арифметика [3].

Ниже рассмотрим метод преобразования и прогнозной аналитики больших временных рядов на примерах построения временных рядов распределений для данных заработной платы работников и

данных по продолжительности жизни с целью анализа дифференциации соответствующих характеристик и анализа прогнозной динамики.

## 1. Распределение работников по размеру заработной платы

В [4] приведено распределение работников по размеру заработной платы. По существу данные представляет частотное распределение работников по размеру заработной платы в виде кусочно-постоянной функции (гистограммы). Наша задача, применяя метод построения рядов распределений, преобразовать данные, используя в качестве модели кусочно-полиномиальные функции.

Для этих целей на первом этапе преобразуем частотное распределение в кусочно-линейную функцию распределения. Для удобства дальнейшей работы она будет представлена в логарифмической системе. Для построения функции плотности распределения работников по размеру заработной платы необходимо продифференцировать функцию распределения. Кусочно-линейные функции распределения для этих целей подходят плохо, так как их дифференцирование приведет к исходной кусочно-постоянной функции плотности. Таким образом, для построения гладкой функции плотности вероятности будем аппроксимировать кусочно-линейную функцию распределения сглаживающим сплайном  $S$  [3]. Для сглаживания используются эрмитовы сплайны пятой степени.

На рисунке 1 представлены кусочно-полиномиальные представления функции распределения заработной платы за 2019 год, синяя линия представляет кусочно-линейную аппроксимацию функции распределения, красная линия есть приближение функции распределения сглаживающим эрмитовым сплайном пятой степени.

Продифференцировав приближение функции распределения сглаживающим эрмитовым сплайном пятой степени, получаем приближение функции плотности вероятности распределения заработной платы за 2019 год. Проводя аналогичные процедуры с данными за 2021 год, получаем, приближение функции распределения за 2021.

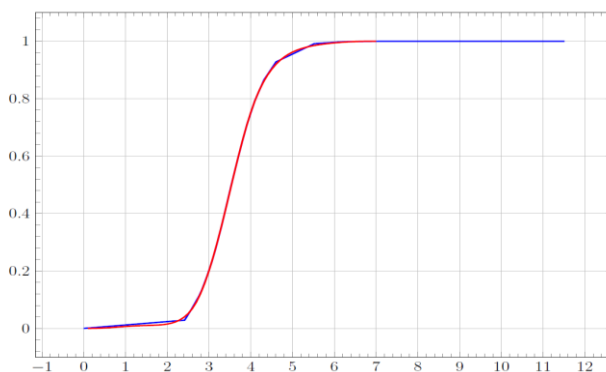


Рис. 1. Кусочно-полиномиальные представления функции распределения заработной платы за 2019 год

Для аппроксимаций использовались эрмитовы сплайны пятой степени. Эти сплайны  $s(x)$  определяются в узлах сетки  $x_i$  значениями  $f_i, f'_i, f''_i$

$$s(x) = \sum_i f_i \varphi((x - x_i)/h_i) + h_i f'_i \varphi_1((x - x_i)/h_i) + h_i^2 f''_i \varphi_2((x - x_i)/h_i),$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i,$$

где  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$  — базисные функции, такие что  $\varphi_i^{(\nu)}(x) = 0, \nu \in \{0, 1, 2\}, x \in \{-1, 0, 1\}$ . Исключение составляют

$$\varphi_0(0) = 1; \varphi'_1(0) = 1; \varphi''_2(0) = 1.$$

Базисные функции в пространстве эрмитовых полиномов пятой степени имеют вид

$$\varphi_0(x) = \begin{cases} -(x-1)^3(6x^2+3x+1), & x \geq 0; \\ (x+1)^3(6x^2-3x+1), & x \leq 0. \end{cases}$$

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} -x(x-1)^3(3x+1), & x \geq 0; \\ -x(x+1)^3(3x-1), & x \leq 0. \end{cases}$$

$$\varphi_2(x) = \begin{cases} -x^2(x-1)^3, & x \geq 0; \\ x^2(x+1)^3, & x \leq 0. \end{cases}$$

На рисунке 2 показаны их графики.

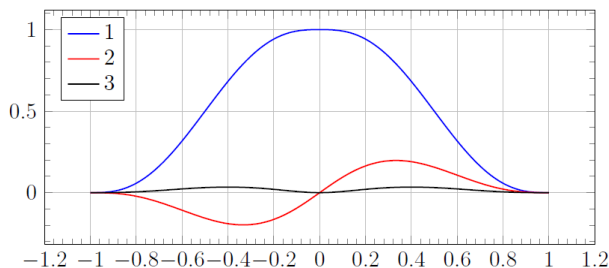


Рис. 2. Базисные функции эрмитового сплайна пятой степени

На рисунке 3 приведены кусочно-полиномиальные представления функций плотности вероятности заработной платы за 2019 и 2021 г.г. Красная линия есть функция плотности вероятности за 2019 г., синяя линия — кусочно-полиномиальное представление функции плотности вероятности заработной платы за 2021 г.

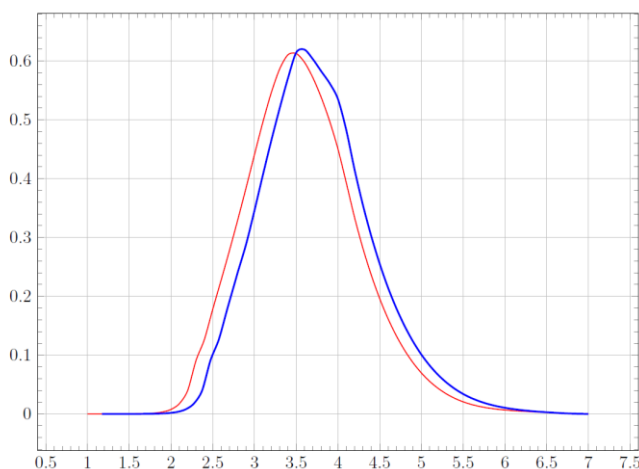


Рис. 3. Сравнение функций плотности вероятности заработной платы за 2019 и 2021 г.г.

Таким образом, исследуя функция плотности вероятности за 2019 и 2021 г.г. можно не только оценить дифференциальные свойства структуры заработной платы, но и динамику ее изменения.

Сравнивая кусочно-полиномиальные представления функций плотности вероятности заработной платы за 2019 и 2021 г.г., легко видеть, общие закономерности в поведении функции плотности вероятности и участки, где функции имеют одинаковый наклон. Между тем максимум функции плотности вероятности за 2021 г. значительно сдвинут в сторону увеличения. Построив кусочно-полиномиальные представления функций плотности вероятности заработной платы за несколько лет, можно представить их в виде временного ряда распределений и далее исследовать их динамику и прогноз.

## 2. Временные ряды распределений продолжительности жизни

Рассмотрим построение прогноза временных рядов распределений на примере рядов распределений продолжительности жизни населения [5].

Ожидаемая продолжительность жизни — это статистическая мера, измеряющая среднюю ожидаемую продолжительность жизни человека в определенной популяции в определенный период времени. Эта метрика представляет собой среднее значение возраста, которое ожидается достичь человеку при условии сохранения на текущем уровне смертности.

Определение продолжительности жизни важно для многих областей, включая демографию, медицину, страхование и общественную политику. Высокая продолжительность жизни обычно свидетельствует о хороших условиях жизни, эффективной медицинской системе и общественных программах. В то время как низкая продолжительность жизни может быть индикатором проблем в системе здравоохранения, неблагоприятных условий окружающей среды, низкого уровня жизни и других социальных проблем. Статистика продолжительности жизни также используется для разработки стратегий общественного здравоохранения и социальной политики, направленных на повышение качества и продолжительности жизни.

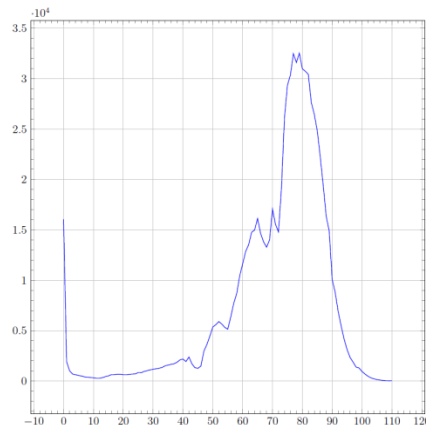
Распределение продолжительности жизни — это статистическая модель, которая описывает вероятность того, что индивиды в популяции будут жить определенное количество лет. Оно помогает

изучать влияние различных факторов, таких как возраст, пол, образ жизни, генетика и окружающая среда, на жизнь индивидуума.

Таблицы смертности представляют собой самый распространённый и точный вид демографических таблиц, которые служат важным инструментом для оценки уровня смертности. Эти таблицы используются для анализа динамики и различий в смертности, а также для характеристики уровня смертности всего населения или отдельных возрастных групп. Они играют ключевую роль в прогнозировании численности и возрастного состава населения, измеряя влияние смертности на другие демографические процессы.

Существуют два основных типа таблиц смертности: для реального и гипотетического (условного) поколения. Полные таблицы смертности содержат данные по возрастам с годовым интервалом (иногда с дополнительным делением первого года по месяцам), тогда как краткие таблицы охватывают пятилетние или десятилетние возрастные интервалы. Таблицы, не привязанные к конкретной группе населения, но отражающие общие закономерности смертности для сходных категорий, называются типовыми таблицами смертности.

В качестве данных для построения временных рядов распределений продолжительности жизни были взяты таблицы смертности в РСФСР и РФ за каждый год с 1959 по 2014 гг. из ресурса Human Mortality Database [6]. Исходные таблицы состоят из пяти столбцов: год, возраст, количество смертей для мужчин и женщин и их общее количество. На каждый годичный период выделено по 111 строк, означающих возраст от 0 до 110. Для примера и построения графика смертности на основе этих данных, и дальнейшего выявления аномалий на них, можно взять в качестве примера график смертности от 1989 г. в РСФСР (представлен на рисунке 4). На оси абсцисс отображено количество смертей за год, на оси ординат – возраст.



*Рис. 4. Распределение продолжительности жизни за 1989 год*

Линия на графике начинается от  $1,6 \times 10^4$  человек, после чего резко снижается до  $0,1 \times 10^4$  человек к одному году жизни, что свидетельствует о достаточно высокой детской смертности в то время. Примерно до возраста в 40 лет график начинает плавно идти вверх, но после этой отметки начинает расти быстрее, до отметки в 65 лет. Далее в графике наблюдается «провал», свидетельствующий о меньшем количестве смертей в возрасте от 65 до 70 лет. Связано это, в первую очередь, с тем, что представители страны данного возрастного промежутка могли погибнуть ещё во время такого катаклизма, как Вторая мировая война и, как следствие, смертей представителей данной возрастной группы в 1989 г. стало меньше, чем

представителей других стран. Пик смертности приходится на людей возрастом 78-79 лет, после которого линия графика начинает резкое снижение до значения  $0,1 \times 10^4$  человек в возрасте 100 лет.

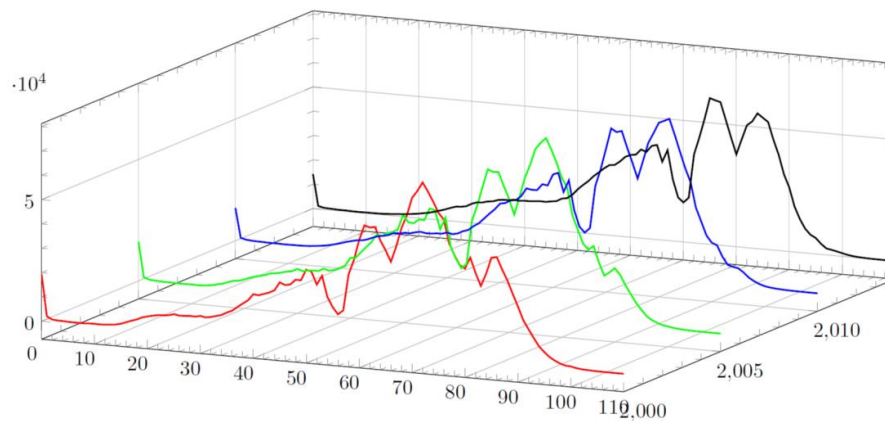


Рис. 5. Временной ряд распределений продолжительности жизни

На рисунке 5 представлены компоненты ВР распределения продолжительности жизни  $R_i$  за 2000, 2005, 2010 и 2014 гг. В качестве обучающей выборки для прогноза ВРР использовались три первые компоненты, и прогноз, для сравнения, строился на 2014 г. Для построения прогноза, распределения продолжительности жизни  $R_i$  приближались кубическими кусочно-полиномиальными функциями  $S_i$ ,  $\omega_i = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ . Для учета разрывности первых производных, в узлах сетки  $\omega_i$  задавались как правые, так и левые производные.

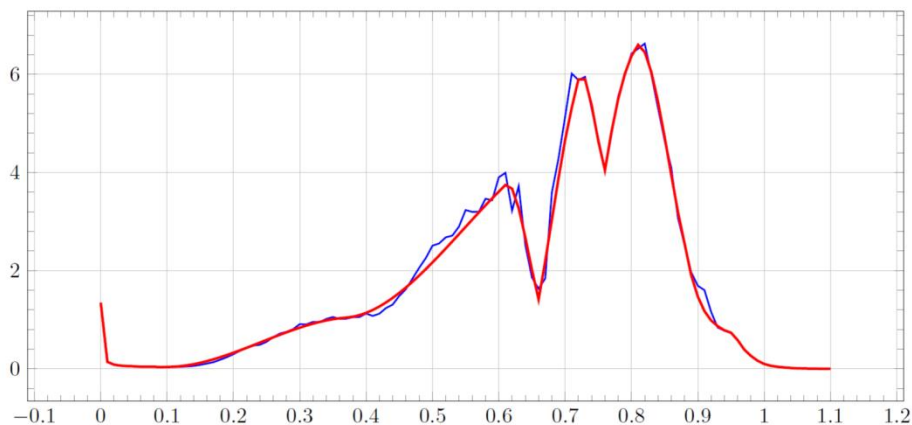


Рис. 67. Кусочно-полиномиальное приближение распределения продолжительности жизни

На рисунке 6 красная линия — кусочно-полиномиальное приближение распределения продолжительности жизни, синяя линия — исходное распределение.



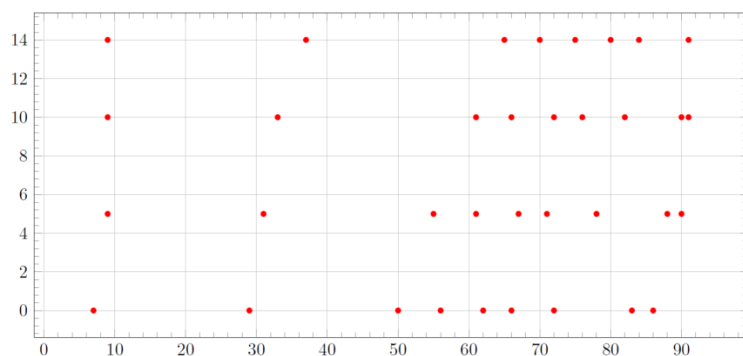


Рис. 7. Узлы кусочно-полиномиальных приближений

На рисунке 7 показаны узлы сеток  $\omega_0, \omega_5, \omega_{10}, \omega_{14}$ . Используя сетки  $\omega_0, \omega_5, \omega_{10}$  и значения функций и их производных в узлах сеток и методы прогноза временных рядов можно построить прогнозное приближение для узлов сетки  $\omega_{14}$  и значений кусочно-полиномиальных функций в 2014 г.

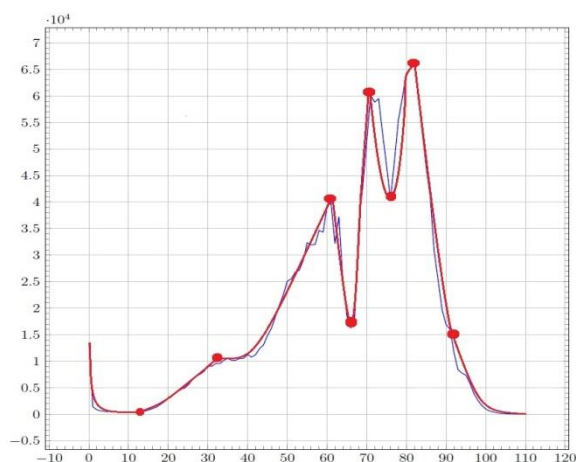


Рис.8. Сравнение прогноза распределения продолжительности жизни на 2014 г.

На рисунке 8 показано сравнение прогноза распределения продолжительности жизни и истинного распределения. В данном случае небольшое число узлов обеспечило достаточно хороший прогноз.

### 3. Заключение

Применение метода построения временных рядов распределений предлагает более информативное представление данных, выполняя с одной стороны, функцию агрегирования больших временных рядов, существенно снижая размерность выборки, а с другой стороны способствует выявлению динамических тенденций, существующих в данных, способствуя обнаружению дополнительных оснований для принятия решений.

В случае применения данного подхода прогнозная аналитика подкрепляется знаниями не только об усредненных представлениях статистических показателей, а показывает траектории эмпирических распределений данных во всем диапазоне их изменчивости.

### Литература

1. Brito P., Dias S. Analysis of Distributional Data. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2022
2. Popova O.A., Dobronets B.S., Merko A.M. Distributional time series for forecasting and risk assessment // Int. J. Risk Assessment and Management, Vol. 24, Nos. 2/3/4, 2021, pp.140–155.
3. Добронетц Б.С., Попова О.А. Вычислительный вероятностный анализ: модели и методы. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2020.
4. Сведения о распределении численности работников по размерам заработной платы // Федеральная служба государственной статистики <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13268>
5. Hyndman R., Heather B., Yasmineen F. Coherent Mortality Forecasting: The Product-Ratio Method With Functional Time Series Models // DOI: 10.1007/s13524-012-0145-5
6. Human Mortality Database // <https://www.mortality.org>

# ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОАКТИВНОЙ АДАПТАЦИЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ К УСКОРЯЮЩИМСЯ ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

**Еналеев А.К., Цыганов В.В.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
anverena@mail, bbc@ipu.ru

**Вега А.Ю.**

*Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Россия*  
Vega.AY@rea.ru

*Аннотация. Разработаны модели и алгоритмы для прогнозирования и планирования объема инвестиций и распределения этих инвестиций с целью адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменениям климата при неполных статистических данных. Проведен анализ проблем оценки риска неблагоприятного воздействия изменения климата на объекты в условиях значительной неопределенности. Предложена структура комплексного оценивания объектов с использованием карт прогнозов климата и оценок уязвимости объектов для последующего отбора адаптационных проектов. Предложен оптимальный механизм стимулирования адаптационных работ, обеспечивающий сообщение управляющему органу достоверной информации от инфраструктурных объектов.*

*Ключевые слова: железнодорожная инфраструктура, изменения климата, адаптационные проекты, оценка риска, размещение инвестиций, механизм стимулирования.*

## **Введение**

Влияние изменения климата (ИК) на железнодорожную инфраструктуру (ЖИ) признано одной из основных проблем железнодорожного транспорта [1]. Оно проявляется в таких последствиях, как разрушение дорожного покрытия, оседание грунта, набухание и затопление рельсов, перегрев и повреждение электрооборудования, размыв мостов и повреждение плотин [2]. Увеличение количества и масштабов таких аварий приводит к перебоям в работе железных дорог и значительным затратам на ремонт ЖИ. Ежегодная стоимость прямого ущерба дорожной инфраструктуре во всем мире составляет от 3,1 до 22 миллиардов долларов США [2].

Однако данные о повреждениях ЖИ, вызванных КК, систематически не собираются, а косвенные экономические последствия отказов РИ недостаточно хорошо изучены [3]. Это приводит к неопределенности в отношении влияния КК на транспортные потоки, а также косвенных эффектов, связанных с задержками, экономическими потерями и т. д. Эта неопределенность усугубляется тем, что конкретные воздействия и последствия для ЖИ зависят от регионального ИК. Например, в [4] рассматриваются особенности влияния ИК на ЖИ в России, Европе, Канаде, США и Китае. Меры по адаптации ЖИ к КК в Канаде, Китае и Швеции рассмотрены в [2].

Особенности адаптации РИ к региональным ИК особенно ярко проявляются в России. Потепление климата в России ускоряется - почти в 2 раза быстрее, чем в среднем по миру [4]. С высокой степенью достоверности можно ожидать, что темпы потепления в Арктике и прилегающих регионах Сибири превысят в 2 раза темпы глобального потепления [2]. Такое ускоренное потепление негативно сказывается на процессе освоения ЖИ в Арктической зоне России и Сибири [5]. Например, при строительстве Байкало-Амурской железной дороги в 1974-1984 гг. сваи для опор ЖИ были забиты в вечную мерзлоту в среднем на глубину 8 м. А при реконструкции Байкало-Амурской железной дороги в 2014-2024 гг. такие сваи пришлось забивать в два раза глубже.

Исследованию проблемы оценки рисков и адаптации ЖИ к ИК посвящено значительное число публикаций. Развернутый анализ основных работ дан в [1], в [6] представлены публикации по мировому опыту по рассматриваемой проблеме. В работе [7] проанализирована информация о железнодорожных авариях, вызванных климатическими причинами в России. Систематизированы климатические факторы, вызывающие такие аварии. Динамика железнодорожных аварий, ущерба и затрат на их ликвидацию в России проанализирована в [8]. Проведен анализ статистических данных об ущербе от климатических аварий на железных дорогах России и затратах на их ликвидацию. Построены распределения количества происшествий, ущерба и затрат на их ликвидацию по годам, месяцам и регионам. Проведенный анализ показал необходимость разработки подходов к стратегическому управлению ЖИ в условиях глубокой неопределенности, вызванной ускоряющимся ростом ИК в России [9].

Обзоры отечественных [10] и международных [1] публикаций показывают, что объекты ЖИ являются взаимозависимыми и требуют комплексного реагирования на климатические воздействия. Для понимания преимуществ адаптации необходима информация об исходных условиях и соответствующая оценка рисков. В работе [11] отмечается, что традиционные методы оценки риска неприменимы в условиях высокой неопределенности условий и неточности долгосрочных климатических прогнозов. Выявленные неопределенности приводят к использованию ранговых показателей потенциального риска

[12], таких как «низкий», «умеренный», «высокий», «очень высокий» и т.д. При комплексной оценке характеристик риска опасных климатических явлений, воздействий и уязвимости объектов в [13] описаны методы применения методологии комплексного оценивания [14,15].

В данном докладе предлагается парадигма адаптации ЖИ к ускоренному ИК в условиях неопределенности, основанная на проактивном подходе, и предлагается набор инструментов реализации этой парадигмы. В состав набора инструментов входят методы оценки объема требуемых инвестиций на адаптацию ЖИ, методы комплексного оценивания риска негативного воздействия ИК на объекты ЖИ и отбора первоочередных объектов для адаптации к ИК, методы распределения инвестиций между проектами адаптации к ИК и механизм стимулирования реализации адаптационных работ. В рамках предлагаемой парадигмы создается стратегическое видение будущих опасных гидрометеорологических явлений, инцидентов и ущерба в России, вызванных КС. На этой основе регламентируются краткосрочные действия и создается нормативная база для распределения инвестиций с целью адаптации РИ к этим изменениям.

Исходя из представления сложности оценки рисков ИК в условиях неопределенности, предлагается подход, основанный на ранговой оценке риска. Описана структура комплексной оценки риска негативного воздействия на объекты ЖИ с использованием карт климатических прогнозов и карт уязвимости объектов. Предлагается подход к формированию портфеля инфраструктурных активов. Их выбор осуществляется в два этапа следующим образом. На первом этапе с помощью комплексной оценки формируется предварительный портфель объектов. На втором этапе инвестиционные ресурсы последовательно распределяются между объектами предварительного портфеля в порядке убывания оценки их специфического риска. Ввиду ограниченности инвестиционного фонда на втором этапе формируется окончательный портфель объектов для реализации адаптационных мероприятий. Представлен механизм стимулирования адаптационных мероприятий в условиях неполной информации управляющего органа. Этот механизм является оптимальным и обеспечивает сообщение достоверной информации управляющему органу от инфраструктурных объектов.

## 1. Прогнозирование фонда адаптации железнодорожной инфраструктуры в условиях ускоренного изменения климата

Прогнозирование и планирование объема финансовых ресурсов, которые будут выделены на адаптацию ЖИ к ИК (сокращенно - адаптационный фонд), требует прогнозирования ожидаемого ущерба и затрат на ремонт ЖИ. Например, в [16] рассматривается применение такой модели для ущерба от наводнений на австрийских железных дорогах RAIL (Railway Infrastructure Loss). Методы оценки затрат на адаптацию российских РИ к изменению климата разработаны в [17].

Рассмотрим модель и алгоритм прогнозирования фонда адаптации, основанные на статистических данных [7, 17, 18]:

- об опасных гидрометеорологических событиях на территории России, нанесших значительный ущерб ее экономике и населению (сокращенно - события);
- об инцидентах на ЖИ России, вызванных последствиями некоторых из этих событий (сокращенно - инциденты);
- об ущербе, нанесенном ЖИ России этими инцидентами.

Обозначим через  $t$  номер года,  $x_t$  - количество событий в году  $t$ ,  $y_t$  - количество инцидентов в году  $t$ ,  $t=1996, 1997, \dots$ . Используя массив данных [18] и метод наименьших квадратов, можно определить линейное уравнение для оценки среднего числа  $m_t$  событий в году  $t$  (кратко - тренд событий):

$$m_t = 14.33(t - 1996) + 163.73, t=1996, 1997, \dots, 2016 \quad (1)$$

Аналогично, используя имеющиеся статистические данные, собранные в [7], можно построить линейное уравнение для оценки среднего количества  $n_t$  инцидентов в году  $t$  (сокращенно - тренд инцидентов):

$$n_t = 0.57(t - 2013) + 2.71, t=2013, \dots, 2018 \quad (2)$$

Однако, к сожалению, из-за неполноты статистических данных использовать уравнение (2) для решения задачи прогнозирования среднегодового количества инцидентов путем экстраполяции не представляется возможным. С другой стороны, решение этой проблемы при неполноте статистических данных о количестве инцидентов может быть основано на следующих соображениях. Инциденты на ЖИ России, вызванные гидрометеорологическими воздействиями, являются последствиями опасных гидрометеорологических явлений, нанесших значительный ущерб экономике и населению. Поэтому число инцидентов на ЖИ в году  $t$  должно коррелировать с числом таких событий в году  $t$ . Кроме того, имеются статистические данные о количестве этих событий в 1996-2016 годах [19], которые позволяют построить тренд (1). Экстраполируя этот тренд, можно получить прогноз  $m_t$  количества указанных событий в году  $t$ ,  $t=2024, 2025, \dots, 2050$ . А затем, исходя из соотношения числа происшествий на ЖИ,

вызванных гидрометеорологическими воздействиями, с числом опасных гидрометеорологических явлений, можно оценить прогноз  $n_t$  числа этих происшествий в году  $t, t=2024, 2025, \dots, 2050$ .

Вышесказанное может служить обоснованием для использования на практике следующей процедуры прогнозирования среднего количества инцидентов. Определяется период совпадения наблюдений за событиями и инцидентами (кратко - период совпадения), для которого имеются статистические данные как по количеству событий [18], так и по количеству инцидентов [8]: с 2012 по 2016 гг.

Используя массив данных из [18], вычисляется среднее количество событий за период совпадений:  $m=416,8$ . Используя массив данных из [8], вычисляется среднее количество происшествий за период совпадений:  $n=5,2$ . Рассчитывается отношение  $k$  среднегодового количества происшествий к среднегодовому количеству событий (коэффициент пропорциональности) за период совпадений:  $k = 5,2/416,8 = 0,012$ .

Прогнозируемое количество  $n_t$  инцидентов в году  $t$  принимается пропорциональным прогнозируемому количеству  $m_t$  событий в году  $t$  с коэффициентом  $k: n_t = km_t$ . Прогноз числа  $n_t$  происшествий в году  $t$  определяется путем экстраполяции тенденции событий (1) с коэффициентом пропорциональности  $k$ :

$$n_t = km_t = 0.18(t - 1996) + 2.04, t=2024, \dots, 2050 \quad (3)$$

Средний ущерб  $d$  от одного инцидента (сокращенно - удельный ущерб) можно определить по массиву данных [17]:  $e=11,92$  млн. рублей. Прогнозируемый ущерб  $d_t$  в году  $t$  рассчитывается как произведение удельного ущерба  $d$  на прогнозируемое количество инцидентов  $n_t$ , поэтому из (3) следует:

$$d_t = dn_t = 2.13(t - 1996) + 24.32, t=2024, \dots, 2050 \quad (4)$$

По статистическим оценкам Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [17], затраты на предупреждение чрезвычайных ситуаций соотносятся с размером ущерба от них как 1:10. В нашем случае роль затрат на предупреждение чрезвычайных ситуаций на ЖИ играет адаптационный фонд. Поэтому прогноз фонда адаптации  $p_t$  в году  $t$  может быть рассчитан как  $p_t=0,1y_t$ . Таким образом, из (4) следует:

$$p_t = 0,21(t - 1996) + 2,43, t=2024, \dots, 2050 \quad (5)$$

Планируемый фонд адаптации (т.е. инвестиции в адаптацию ЖИ)  $i_t$  в году  $t$  принимается равным прогнозу фонда  $p_t: i_t = p_t$ .

## 2. Комплексное оценивание риска и размещение адаптационного фонда

Статистические подходы к оценке долгосрочных прогнозов КС-инцидентов и связанных с ними затрат на адаптацию транспортной инфраструктуры, скорее всего, будут оптимистичными, поскольку они недостаточно учитывают влияние различных факторов, которые в совокупности вызывают синергетический негативный эффект. Неточность прогнозов, основанных на анализе недостаточных статистических данных об изменениях различных климатических факторов и их совокупном воздействии на инфраструктуру, заставляет нас использовать альтернативный подход к решению проблемы. Этот подход основан на ранжированных оценках прогноза климатических факторов и их совокупного воздействия на ЖИ. Мы рекомендуем оценивать степень влияния нескольких климатических факторов на объект ЖИ с помощью метода комплексной оценки [14, 15], основанного на дереве попарной свертки ранговых показателей. Свертка пары показателей в один объединяющий осуществляется с помощью матрицы свертки. Вид этой матрицы приведен в таблице 1.

Для выявления объектов с наибольшим риском повреждения от КС мы предлагаем применить метод комплексной оценки, основанный на использовании ранговых показателей [13-15] и применимый в условиях неполных и неточных исходных данных. Для оценки рангов и матриц свертки можно использовать подход и пример, рассмотренный в [15]. Обычно матрицы формируются на основе экспертных оценок. Опыт применения комплексной оценки показал приемлемость использования следующей схемы. Сначала матрицы свертки формируются на основе здравого смысла и консультаций с потенциальными пользователями системы, а затем корректируются в процессе опытной эксплуатации.

Таблица 1. Матрица свертки для пары показателей

Ранг показателя для климатического фактора $i$	Ранг показателя для климатического фактора $j$			
	$R(i,j)_{11}$	$R(i,j)_{12}$	$R(i,j)_{13}$	$R(i,j)_{14}$
	$R(i,j)_{21}$	$R(i,j)_{22}$	$R(i,j)_{23}$	$R(i,j)_{24}$
	$R(i,j)_{31}$	$R(i,j)_{32}$	$R(i,j)_{33}$	$R(i,j)_{34}$

В таблице 1 приведен пример матрицы 3x4 для свертки некоторых показателей с номерами  $i$  и  $j$ . Предполагается, что ранги описываются натуральными числами и размерность ранговой шкалы показателя  $i$  равна 3, а размерность шкалы показателя  $j$  равна 4, что соответствует количеству строк и столбцов рассматриваемой матрицы. Ранг свертки индикаторов  $i$  и  $j$  обозначается  $R(i,j)_{kl}$ , где  $k$  - ранговое значение индикатора  $i, l$  - ранговое значение индикатора  $j, 1 \leq k \leq 3, 1 \leq l \leq 4$ . На рис. 1 и 2 показан пример

дерева для оценки влияния климатических факторов (осадки, циклон, наводнение, размыв) на опоры железнодорожного моста.

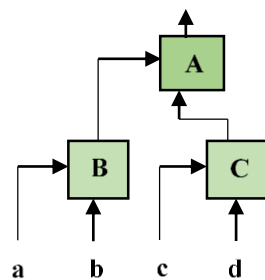


Рис. 1. Оценка рейтинга ущерба от фактора климатической опасности (**a** - ранг уровня воздействия климатической опасности; **b** - ранг уязвимости инфраструктуры; **c** - ранг прямого эффекта; **d** - ранг косвенного эффекта; **B** - матрица свертки рангов **a** и **b**; **C** - матрица свертки рангов **c** и **d**; **A** - матрица свертки рангов **B** и **C**).

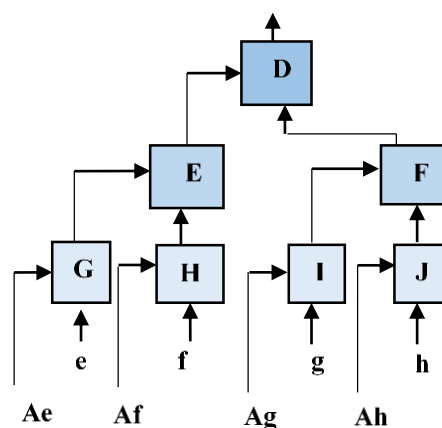


Рис. 2. Комплексная оценка риска опасностей, действующих на инфраструктурный объект (**e** - ранг фактора опасности (осадки); **Ae** - ущерб от фактора **e**; **f** - ранг фактора опасности (циклон); **Af** - ранг ущерба от фактора **f**; **g** - ранг фактора опасности (наводнение); **Ag** - ранг ущерба от фактора **g**; **h** - ранг фактора опасности (размыв); **Ah** - ранг ущерба от фактора **h**; **G** - матрица свертки рангов **e** и **Ae**; **H** - матрица свертки рангов **f** и **Af**; **I** - матрица свертки рангов **g** и **Ag**; **J** - матрица свертки рангов **h** и **Ah**; **E** - матрица свертки рангов на выходе свертки **G** и **H**; **F** - матрица свертки рангов на выходе свертки **I** и **J**; **D** - комплексная оценка риска опасностей, действующих на объект из набора факторов).

Схема, изображенная на рис. 1, используется для определения рангов ущерба для опасностей. Затем, в соответствии с деревом, представленным на рис. 2, и заранее определенными матрицами свертки, оценивается риск опасности всех факторов, действующих на рассматриваемый объект ЖИ.

Используя метод комплексной оценки воздействия климатических факторов на объекты инфраструктуры на основе дерева и матриц свертки в его узлах, можно предварительно выбрать наиболее уязвимые объекты ЖИ и те, которые подвержены максимальному ущербу. Это особенно необходимо при недостатке ресурсов, в том числе финансовых, для реализации мер по адаптации к ИК. Поэтому в первую очередь ресурсы должны быть направлены на адаптацию отобранных объектов ЖИ.

В тех случаях, когда ресурсов не хватает даже на предварительно отобранные объекты, необходимо проводить дальнейший, но уже уточненный анализ рисков ущерба и затрат на снижение этого риска не для всех объектов инфраструктуры, а только для предварительно отобранных объектов. Это позволяет снизить стоимость обследования участка. Результатом углубленного анализа объектов ЖИ являются численные значения риска их повреждения от воздействия ИК. Затем на основе полученных данных о значениях рисков  $r_i$  и требуемых ресурсов  $w_i$ , где  $i$  - номер предварительно отобранного объекта ЖИ, ресурсы распределяются в порядке убывания  $k_i = r_i / w_i$  до тех пор, пока имеющийся запас ресурсов не будет исчерпан. Эта процедура распределения ресурсов похожа на «жадный» алгоритм в задаче о ранце. На практике существует возможность увеличить запас выделяемых ресурсов в определенных пределах. В этом случае описанный алгоритм может быть оптимальным. В работе [19] предложены алгоритмы распределения ресурсов в системе взаимосвязанных объектов ЖИ.

Методы комплексного оценивания риска и размещения адаптационного фонда позволяют осуществить отбор объектов ЖИ для проведения адаптационных мероприятий. Это закладывает основу для разработки адаптационных проектов на конкретных объектах ЖИ и формирования детального плана работ. Конечно же для этого необходимо провести дополнительную и более тщательную оценку

отобранных объектов, включая степень их подверженности воздействию прогнозируемых климатических факторов и уязвимости. Одним из способов снижения стоимости такого исследования является получение необходимых данных от представителей и специалистов объектов ЖИ. Однако при сообщении информации объектов ЖИ может возникнуть проблема манипулирования данными.

### 3. Проблема манипулирования и модель механизма стимулирования адаптационных работ

Предположим, что представители объектов, имеющие опыт работы на объекте и наблюдающие за воздействием текущих погодных факторов, могут достаточно точно предсказать степень их уязвимости. В связи с этим возникает проблема, как сделать так, чтобы эти представители были заинтересованы в предоставлении достоверных данных. Следующая модель стимулирования позволяет решить эту проблему.

Пусть имеется управляющий орган (УО) и представитель объекта (агент), реализующего проект адаптации с целевыми функциями УО  $\Phi = B(x^0 p - x) + g$  и агента  $f(x, \xi, r) = \sigma(x) - \zeta(x, p)$ . Здесь  $p = \xi r$ ,  $\xi$  – степень воздействия ИК на объект ЖИ,  $r$  – параметр, характеризующий уязвимость объекта ЖИ,  $\xi \in [0, 1]$ ,  $r \in [0, 1]$ ,  $x$  – план адаптации, где  $x \in X(x^0, \xi, r) \in X^0 = [0, x^0]$ ,  $x^0$  – максимальный объем адаптационных мер, необходимых для полного смягчения климатических воздействий на объект при максимальном уровне воздействия и уязвимости,  $g$  – фонд стимулирования,  $B > 0$ ,  $\zeta(x, p) = \frac{\beta p x^0}{p x^0 - x}$ ,  $\beta >$

$0$ ,  $\sigma(x)$  – функция поощрения.

Предположим, что объект ЖИ знает значения параметров  $\xi$  и  $r$ , а УО знает только границы их возможных значений,  $\eta_1 \leq \xi \leq \eta_2$ ,  $s_1 \leq r \leq s_2$ .

УО назначает механизм  $\mu = \{\pi(\cdot), \sigma(\cdot)\}$ , состоящий из процедуры планирования  $x = \pi(\eta, s)$  и функции поощрения  $\sigma(x)$ , где  $\sigma(x) \leq g$ ,  $\eta$  – сообщение агента о параметре  $\xi$ ,  $s$  – сообщение агента о параметре  $r$ .

Задача заключается в определении механизма, обеспечивающего минимальные потери выигрыш УО, определяемые его целевой функцией, и сообщение агентом в УО достоверных данных,  $\eta = \xi$ ,  $s = r$ .

Используя методологию согласованного управления [20], определен оптимальный механизм, обеспечивающий сообщение достоверных данных,  $q = p$ :

$$x = \pi(q) = x^0 q - (\gamma - \tau g) / Bb, \text{ где } q = \eta s,$$

$$\sigma(x) = \beta \int_0^x \left[ \frac{B^2}{(\gamma - g)^2} t + \frac{B}{\gamma - g} \right] dt = \beta \frac{B^2}{2(\gamma - g)^2} x^2 + \beta \frac{B}{\gamma - g} x.$$

При этом эффективность механизма определяется величиной

$$\gamma = g + \begin{cases} Bx^0 q_2 \sqrt{\frac{\beta}{2g}}, & \text{если } \frac{\beta}{2g} \leq 1 \\ Bx^0 q_2, & \text{если } \frac{\beta}{2g} > 1 \end{cases}, \text{ где } q_2 = \eta_2 s_2.$$

Предложенные механизмы могут лечь в основу рекомендаций по отбору объектов ЖИ подлежащих проведению адаптационных мероприятий и по развитию нормативно-технической документации, регулирующей деятельность транспортных организаций, отвечающих за обеспечение безопасности функционирования ЖИ и природоохранные мероприятия.

### 5. Заключение

Проактивный подход к стратегическому управлению ЖИ в условиях изменения климата предполагает, во-первых, прогнозирование и планирование объема инвестиций для адаптации ЖИ к ИК, а во-вторых, отбор приоритетных объектов ЖИ для проведения адаптационных мероприятий к ИК, оптимальное распределение адаптационного фонда между отобранными объектами ЖИ. Модели, методы и алгоритмы планирования таких инвестиций разработаны для условий необходимости принятия решений при неполной статистической информации и с учетом прогнозов гидрометеорологических явлений в Российской Федерации.

Эти модели и алгоритмы были использованы для разработки сценариев, описывающих последствия изменения климата для ЖИ, с учетом статистики опасных гидрометеорологических явлений [21]. В

рамках этих сценариев выполнены оценки климатических рисков, ущерба от инцидентов, связанных с климатическими воздействиями, затрат на их устранение, а также инвестиций, направленных на адаптацию ЖИ и предотвращение ущерба от инцидентов на железных дорогах, вызванных климатическими факторами. На основе указанных моделей, алгоритмов и сценариев разработаны предложения по управлению погодно-климатическими рисками для инфраструктуры ОАО «РЖД» в условиях изменяющегося климата на период до 2050 года.

## Литература

1. *Palin E., Stipanovic Oslakovic I., Gavin K., and A. Quinn A.* Implications of climate change for railway infrastructure // WIREs Climate Change. 2021. –Vol. 12, no. 5. – DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.728>.
2. *Kostianaia E.A., Kostianoy A.G., Scheglov M.A., Karelov A.I., and Vasileisky A.S.* Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport // Transport and Telecommunication. 2021. –Vol. 22(2). – P. 183-195.
3. *Bubeck P., Dillenardt L., Alfieri L., Feyen L., Thielen A.H. et al.* Global warming to increase flood risk on European railways // Climatic Change. 2019. – Vol. 155(1). – P. 19-36.
4. *Kostianaia E.A. and Kostianoy A.G.* Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport // Transport and Telecommunication. 2023. – Vol. 24, no. 2. – P. 180—194.
5. *Tsyganov V.* Development of infrastructure in Siberia, the Far East and the Arctic zone of Russia // Proc. of the 12th Internat. Conf. on Management of Large-Scale System Development. – Moscow: IEEE. 2019. – P. 1-5.
6. *Еналеев А.К., Цыганов В.В.* Мировой опыт применения мероприятий в области адаптации железнодорожного транспорта к изменениям климата // Материалы Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2022». – СПб: ИПТ РАН. 2022. – С. 143-146.
7. *Савушкин С., Искорестинский А., Лемешкова А.* Климатические причины железнодорожных аварий // Информационные технологии в образовании, науке и управлении. 2023. – Т. 2. – С. 19-24.
8. *Цыганов В., Савушкин С., Лемешкова А.* Динамика железнодорожных аварий, ущерб и затрат на их ликвидацию // Информационные технологии в образовании, науке и управлении. 2023. – Т. 2. – С. 14-19.
9. *Tsyganov V.* Infrastructure development management platform in extreme climate // Proc. of the 13th Internat. Conf. on Management of Large-Scale System Development. – Moscow: IEEE. 2020. – P. 1-5.
10. *Быков А. А.* О рисках изменения климата и устойчивого развития // Проблемы анализа риска. 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 8–14
11. *Enaleev A.* Measures to counter the negative impacts of climate change on infrastructure facilities // Proc. of the 5th Internat. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. Lipetsk: IEEE, 2023, pp. 852-857.
12. *Мухеев П. Н.* О подходах к учету рисков изменения климатических условий при планировании и реализации нефтегазовых проектов // Проблемы анализа риска. 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 52-65.
13. *Vega A.Yu., Enaleev A.K.* Комплексное оценивание влияния изменения климата и механизм финансирования адаптационных мероприятий для инфраструктурных объектов // Проблемы управления. 2024. – №2. – С.42-59. [Yu. Vega and A. K. Enaleev, “Integrated climate change impact assessment and an adaptation financing mechanism for infrastructure facilities,” Control Sciences, vol. 2, pp. 33-47. 2024.]
14. *Транезников В.А., В.Н. Бурков В.Н., А.В. Толстых А.В., Черкашин А.М., Цыганов В.В.* и др. Комплексный метод подхода к управлению в отраслевом научно-техническом прогрессе // Вестник Академии наук СССР. 1983. – Т. 3, – С. 33-43.
15. *Бурков В.Н., Еналеев А.К., Строгонов В.И., Федянин Д.Н.* Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта) I. Механизмы отбора приоритетных проектов и распределения ресурсов // Управление большими системами. 2018. – Выпуск 74. – С. 81-107.
16. *Kellermann P., Schönberger C., and Thielen A. H.* Large-scale application of the flood damage model Railway Infrastructure Loss (RAIL) // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2016. – Vol. 16, – P. 2357–2371.
17. *Савушкин С., Горбунов В., Лемешкова А.* Методы оценки стоимости адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменению климата // Информационные технологии в образовании, науке и управлении. 2023. – Т. 2. – С. 8-13,
18. *Катцова В.М.* Доклад о климатических рисках в Российской Федерации. – СПб: Климатический центр Росгидромета, – 2017.
19. *Бурков В.Н., Еналеев А.К.* Оптимальное распределение ресурса в сетевых структурах // одиннадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): труды Одиннадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2018. –Том 1, – С. 80-83.
20. *Еналеев А. К.* Оптимальность согласованных механизмов функционирования в активных системах // Управление большими системами. 2011. – Выпуск 33. – С.143-166. [A. Enaleev A. K. Optimal incentive-compatible mechanisms in active systems // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, no. 3. – P. 491–505].
21. *Цыганов В., Бородин В., Савушкин С.* Сценарии воздействия изменения климата на железнодорожную инфраструктуру // Информационные технологии в образовании, науке и управлении. 2023. – Т. 2, – С. 3-8.

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ КОНВЕРТЕРОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ КВАЗИПЕРИОДИЧНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия*

**Корнет М.Е.**

*НИТУ Московский Институт стали и сплавов, г. Москва, Россия*

**Буркова И. В., д. т. н.,**

*Институт проблем управления им. Трапезникова, г. Москва, Россия*

*Аннотация. В статье приведена математическая постановка задачи синхронного планирования (на интервале нескольких плановых периодов) ремонтов и работы конвертеров сталеплавильного производства, включающего два цеха с, соответственно, двумя и тремя конверторами. Остановки конверторов на ремонт зависят от нормативных длительностей кампаний конверторов и календарных планов их работы и выполняются с нерегулярной периодичностью. Предложенный критерий направлен на постоянную готовность цехов обеспечивать проектную производительность, необходимую для переработки непрерывно поступающего чугуна.*

*Ключевые слова: сталеплавильное производство, конвертор, длительность кампании конвертера, конверторный цех, квазипериодичность, календарный план, проектная производительность, постановка задачи, оптимальный план.*

## **Введение**

Задача планирования ремонтов конвертеров сталеплавильного производства имеет существенную особенность. Она состоит в том, что задачу необходимо решать одновременно с построением календарного плана работы конверторов. Как правило, при планировании ремонтов других металлургических агрегатов график ремонта является частью исходных данных для их календарного планирования. Это отличие обусловлено тем, что конвертер останавливают на ремонт после того, как количество выпущенных им плавок достигает значения, называемого нормативной длительностью кампании конвертера. А это значит, что время достижения нормативной длительности (время начала ремонта) зависит от календарного плана работы конвертера, вследствие чего ремонты выполняются с нерегулярной периодичностью [1 -6].

## **1. Основные понятия, обозначения**

Обозначим через  $O = \{O_I, O_{II}\}$  сталеплавильное производство, включающее два цеха. Причем  $O_I = \{o_1, o_2, o_3\}$  и  $O_{II} = \{o_4, o_5\}$ , следовательно, в первом цехе имеется три конвертера одного типа, а во втором – два. Интервал планирования ремонтов конвертеров зависит, прежде всего, от нормативных длительностей компаний конвертеров, их емкостей и месячных объемов чугуна, требующего переработки. Пусть  $(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_p)$  - последовательность месяцев интервала планирования ремонтов конвертеров, где  $T_j = (\Delta t_{s_j} | s_j = \overline{1, S_j})$ ,  $S_j$  – количество суток в  $j$ -ом месяце. Пусть  $g(O_I)$  и  $g(O_{II})$  - объемы перерабатываемого чугуна за один цикл конвертерами, соответственно, первого и второго цеха,  $\rho_I, \rho_{II}$  - расходные коэффициенты на чугун для выплавки тонны стали в соответствующих цехах,  $K_I$  и  $K_{II}$  – нормативные значения длительностей кампаний конвертеров, соответственно, в первом и втором цехе. Обозначим через  $\{(s_j^{r_i^n}, s_j^{r_i^e}) | c = \overline{1, 2, \dots}\}, i = \overline{1, 5}$  - искомые интервалы плановых ремонтов конвертеров, где  $s_j^{r_i^n}, s_j^{r_i^e}$  – сутки начала и, соответственно, окончания  $c$ -го ремонта  $i$ -го конвертера. При  $j = j'$  ремонт начинается и заканчивается в плановом периоде  $j$ . При  $j \neq j'$  ремонт начинается в периоде  $j$ , а заканчивается в периоде  $j'$ , причем в  $j$ -ом периоде ремонт длится  $(S_j - s_j^{r_i^n})$  суток, а в периоде  $j' - s_j^{r_i^e}$  суток.

Заметим, что сокращение предложений металлолома в рыночных условиях привели к сопоставимости цен на металлолом с себестоимостью производства чугуна. Вследствие этого коэффициенты  $\rho_I, \rho_{II}$



расхода чугуна на тонну стали перестали рассматриваться в качестве констант, а получили интервальную оценку:

$$\begin{aligned} \rho_I &\in (\rho_I^{\min}, \rho_I^{\max}), \\ \rho_{II} &\in (\rho_{II}^{\min}, \rho_{II}^{\max}). \end{aligned} \quad (1)$$

Благодаря совершенствованию технологии конвертерного производства (внедрению внепечной обработки стали, оперативной оценки текущего состояния футеровки конвертера, организации периодических горячих ремонтов между очередными холодными) длительность кампании конвертера существенно увеличилась и сегодня достигает 6000 тысяч плавов. Сократилось общее число холодных ремонтов конвертера.

Кроме того, различные поставщики специализированных материалов для горячих ремонтов гарантируют различные длительности кампаний конвертеров (устоявшимся термином стал термин «гарантированная стойкость конвертера»). Величина длительности кампании стала относиться к конкретному поставщику, с которым заключается контракт:

$$\begin{aligned} K_I &= (K_I^{\min}, K_I^{\max}), \\ K_{II} &= (K_{II}^{\min}, K_{II}^{\max}). \end{aligned} \quad (2)$$

Существенно изменилось представление о длительности холодного ремонта, под которым изначально понималось период времени замены футеровки конвертера. Сегодня часто совмещают холодный ремонт конвертера с ремонтами смежного оборудования и ремонтами других металлургических агрегатов. Вследствие этого длительность остановки конвертера на ремонт может превышать длительность текущего планового периода.

Далее, если не оговорено специально, будем исходить из того, что оценки введенных параметров носят точечный, а не интервальный характер.

Обозначим через  $m_{ij}(\Delta t_{s_j}), m_{Ij}(\Delta t_{s_j}), m_{IIj}(\Delta t_{s_j})$ , соответственно, количество плавов, выпускаемых конвертером  $i$ , цехом  $O_I$ , цехом  $O_{II}$  в сутки  $\Delta t_{s_j}$ . Очевидно

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) &= m_{Ij}(\Delta t_{s_j}) \\ \sum_{i=4}^5 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) &= m_{IIj}(\Delta t_{s_j}) \end{aligned} \quad (3)$$

Под календарным планом работы  $i$ -го конвертера в  $j$ -ом месяце будем понимать последовательность

$$(m_{ij}(\Delta t_{s_j}) | s = \overline{1, S_j}) \quad (4)$$

На совместную работу конвертеров в цехах накладываются технологические ограничения, определяющие диапазон изменения числа плавов в сутки в каждом цехе при одном или двух одновременно работающих конвертерах:

$$\underline{m}_i^1 \leq m_{ij}(\Delta t_{s_j}) \leq \overline{m}_i^1, \quad i = \overline{1, 3}, j = \overline{1, P}; \quad (5)$$

$$\underline{m}_{II}^1 \leq m_{ij}(\Delta t_{s_j}) \leq \overline{m}_{II}^1, \quad i = \overline{4, 5}, j = \overline{1, P}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 2\underline{m}_I^1 &\leq (m_{ij}(\Delta t_s) + m_{i'j}(\Delta t_s)) \leq 2\overline{m}_I^1, \\ i &\neq i', i, i' = \overline{1, 3}, j = \overline{1, P}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$2\underline{m}_{II}^1 \leq (m_{4j}(\Delta t_s) + m_{5j}(\Delta t_s)) \leq 2\overline{m}_{II}^1, \quad j = \overline{1, P} \quad (8)$$

Здесь  $\underline{m}_I^1, \overline{m}_I^1, \underline{m}_{II}^1, \overline{m}_{II}^1, 2\underline{m}_I^1, 2\overline{m}_I^1, 2\underline{m}_{II}^1, 2\overline{m}_{II}^1$  соответственно, минимальное и максимальное количество плавов, выпускаемых в первом и втором цехе при работе одним конвертером, а также

минимальное и максимальное количество плавов, выпускаемых в цехах при работе двумя конвертерами. Работа тремя конвертерами в первом цехе технологически не реализуема.

Введем функцию  $k_{ij}(s_j)$ , описывающую количество плавов, выпущенных  $i$ -ым конвертером на окончание  $s_j$  суток  $j$ -го периода. Оно ограничено длительностями кампаний конверторов

$$k_{ij}(s_j) \leq \begin{cases} K_I, & i=\overline{1,3} \\ K_{II}, & i=\overline{4,5} \end{cases} \quad (9)$$

Множество времен  $s_j^{r_c^n}$  начала ремонта конверторов определяется соотношениями

$$\begin{aligned} & \{s_j^{r_c^n} \mid k_{ij}(s_j) \geq K_I\}, \quad i=\overline{1,3} \\ & \{s_j^{r_c^n} \mid k_{ij}(s_j) \geq K_{II}\}, \quad i=\overline{4,5} \end{aligned} \quad (10)$$

Времена  $s_j^{r_c^e}$  окончания соответствующих ремонтов определяются их заданными длительностями  $r_{ic}^e$ ,  $c = \overline{1,2,\dots}$ .

Проектные решения и система организации ремонтов в сталеплавильном производстве не допускают выполнения в одном цехе двух холодных ремонтов в одном плановом периоде, причем первый цех спроектирован исходя из требования постоянной работоспособности двух конверторов (третий находится в ремонте или резерве). Таким образом, в каждом цехе реализуется в каждом плановом периоде  $T_j$  один из четырех возможных режимов работы:

1. Не выполняется ремонт ни одного из двух работающих конверторов

$$(s_j^{r_c^n}, s_j^{r_c^e}) \not\subset T_j \quad (11)$$

2. Ремонтируется один из работающих конверторов

$$(s_j^{r_c^n}, s_j^{r_c^e}) \subset T_j \quad (12)$$

3. Завершается ремонт одного из работающих конверторов, начатый в периоде  $T_{j-1}$

$$(s_{j-1}^{r_c^n}, s_j^{r_c^e}) \cap T_j = \overline{1, s_j^{r_c^e}} \quad (13)$$

Начинается ремонт одного из работающих конверторов, который завершится в периоде  $T_{j+1}$

$$(s_j^{r_c^n}, s_{j+1}^{r_c^e}) \cap T_j = \overline{s_{j+1}^{r_c^n}, S_j} \quad (14)$$

Обозначим через  $k_{ij}^n$  количество плавов, выпущенных  $i$ -ым конвертером на начало  $j$ -го периода планирования. Тогда, с учетом (4), количество плавов  $k_{ij}^e$ , выпущенных  $i$ -ым конвертером на конец  $j$ -го планового периода для каждого из режимов работы описываются функциями

$$1. \quad k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=1}^{S_j} m_i(\Delta t_{s_j}) \quad (15)$$

$$2. \quad k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=1}^{s_j^{r_c^n}} m_i(\Delta t_{s_j}) + \sum_{l=s_j^{r_c^e}+1}^{S_j} m_i(\Delta t_{s_j}) \quad (16)$$

$$3. \quad k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=s_j^{r_c^e}+1}^{S_j} m_i(\Delta t_{s_j}) \quad (17)$$

$$4. \quad k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=1}^{s_j^{r_c^n}} m_i(\Delta t_{s_j}) \quad (18)$$

Функция  $k_{ij}(s_j)$ , описывающая количество плавов, выпущенных  $i$ -ым конвертером на конец  $s_j$  суток, обладает свойством квазипериодичности (реализует нерегулярную периодичность). Она имеет «пилообразный» вид, максимальное значение ее равно  $K_I$  для конверторов первого цеха и  $K_{II}$  - для второго. Размер основания «зуба пилы» зависит от количества плавов, выпускаемых конвертером в каждые сутки до достижения функцией максимума после которого она обращается в 0. «Расстояние»

между зубьями пилы, представляет собой время ремонта конвертора, в течение которого функция также равна 0.

Колебания функции  $k_{ij}(s_j)$  следуют регулярному шаблону, но не имеют фиксированного периода.

Последовательностями  $(g_j^{ex}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j}), (g_{Ij}^{ex}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j}), (g_{IIj}^{ex}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j})$  опишем посуточное поступление жидкого чугуна из доменного производства, соответственно, в целом в сталеплавильное производство, в первый и второй цехи для производства стали в  $j$ -ом периоде. Очевидно,  $g_{Ij}^{ex}(\Delta t_{s_j}) + g_{IIj}^{ex}(\Delta t_{s_j}) = g_j^{ex}(\Delta t_{s_j}), s_j = \overline{1, S_j}$ . Пусть  $\sum_{s_o=1}^{S_j} g_j^{ex}(\Delta t_{s_j}) = G_{Tj}^{ex}$ , где  $G_{Tj}^{ex}$  - месячный объем требующего переработки чугуна. Аналогично определим величины  $G_{IIj}^{ex}$  и  $G_{IIIj}^{ex}$ ,  $G_{IIj}^{ex} + G_{IIIj}^{ex} = G_{Tj}^{ex}$ . Для определения числа плавов, требующихся для переработки поступающего чугуна в  $s_j$ -е сутки, описываемого последовательностью  $(g_{Ij}^{ex}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j})$ , используем следующую рекурсивную процедуру:

$$\begin{aligned} m_{Ij}^{ex}(\Delta t_1) &= \left[ \frac{g_{Ij}^{ex}(\Delta t_1)}{g(O_I)} \right], \\ m_{Ij}^{ex}(\Delta t_2) &= \left[ \frac{g_{Ij}^{ex}(\Delta t_2) + (g_{Ij}^{ex}(\Delta t_1) - \frac{m_{Ij}^{ex}(\Delta t_1)g(O_I)\rho_I}{g(O_I)})}{g(O_I)} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

и так далее до  $s_j = S_j$ . В результате получим последовательность  $(m_I^{ex}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j})$  описывающую количество плавов, которое должен выпускать каждые сутки первый цех. Аналогично вычисляется последовательность  $(m_{II}^{ex}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j})$  для второго цеха. Обозначим через  $M_{IIj} = \sum_{s_j=1}^{S_j} m_I^{ex}(\Delta t_{s_j})$  и

$M_{IIIj} = \sum_{s_j=1}^{S_j} m_{II}^{ex}(\Delta t_{s_j})$  - месячные объемы требующего переработки чугуна в первом и втором цехе,

выраженные в количестве плавов. Очевидно

$$M_{IIj}g(O_I) + M_{IIIj}g(O_{II}) = G_{Tj}^{ex}$$

Достигнутый на сегодня уровень длительностей кампаний конверторов кратно превышает месячный объем производства соответствующего цеха

$$M_{IIj} \ll K_I, M_{IIIj} \ll K_{II} \quad (20)$$

Сформулируем условие, которое позволяет избежать выполнения в одном цехе двух холодных ремонтов в одном плановом периоде. Сделаем это вначале для второго цеха с двумя конверторами. В следствие свойства квазипериодичности функций  $k_{4j}(s_j)$  и  $k_{5j}(s_j)$ , а также одинаковой длительности  $K_{II}$  кампаний соответствующих конверторов, максимально возможная разность значений функций  $k_{4j}(s_j)$  и  $k_{5j}(s_j)$  равна  $K_{II}/2$ :

$$|k_{4j}(s_j) - k_{5j}(s_j)| \leq K_{II} / 2 \quad (21)$$

Таким образом, наилучший способ «развести» во времени ремонты четвертого и пятого конверторов - постоянно поддерживать приближенное равенство

$$|k_{4j}(s_j) - k_{5j}(s_j)| \approx K_{II} / 2 \quad (22)$$

Из соотношения (20) также следует, что при остановке на ремонт одного из конверторов у другого остается достаточно мощностей, позволяющих ему отработать весь текущий плановый период.

Проектные решения для первого цеха с тремя конверторами предусматривают режим постоянной работоспособности двух конверторов. при этом Третий при этом находится в ремонте или резерве и включается в работу в момент остановки на ремонт одного из работающих конверторов. При такой схеме

работы с двумя постоянно работающими конверторами в качестве условия «разведения» во времени их ремонтов, как и для второго цеха, можно записать

$$|k_{ij}(s_j) - k_{i'j}(s_j)| \approx K_I / 2, \quad i, i' \in \{1, 2, 3\}, \quad (23)$$

где  $i, i' \in \{1, 2, 3\}$  – работающие в первом цехе в сутки  $s_j$  конверторы.

## 2. Постановка задачи планирования ремонтов и работы конверторов в плановых периодах $(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_P)$

Требуется найти такие последовательности

$$(m_{ij}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j}), \quad i = \overline{1, 5}, \quad j = \overline{1, P} \quad (24)$$

и такие графики ремонтов конверторов

$$(s_j^{r_i}, s_j^{f_i}) \subset \bigcup_{j=1}^P T_j, \quad i = \overline{1, 5}, \quad c = \overline{1, 2, \dots}, \quad (25)$$

которые удовлетворяют ограничениям (5)-(8), ограничению

$$g(O_I) \sum_{i=1}^3 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) + g(O_{II}) \sum_{i=4}^5 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) = g_j^{ax}(\Delta t_{s_j}), \quad (26)$$

условиям (11)-(14) выполнения ремонтов конверторами в технологических режимах работы и минимизируют критерий (27):

$$Q = \sum_{j=1}^P \{ (|k_{ij}^e - k_{i'j}^e| - 0,5K_I) + (|k_{4j}^e - k_{5j}^e| - 0,5K_{II}) \} \rightarrow \min, \quad (27)$$

где  $i, i' \in \{1, 2, 3\}$  – индексы работающих в первом цехе в сутки  $S_j$  конверторы, а значения  $k_{ij}^e$  определяются в соответствии с правилами (15)-(18). Критерий направлен на создание условий для реализации проектных производительностей цехов в каждом плановом периоде.

## 3. Заключение

Подходы к решению сформулированной задачи, схема разложения задачи, алгоритмы решения отдельных подзадач и задачи композиции решений подзадач будут составлять предмет дальнейших исследований авторов.

## Литература

1. Прохоров И. М. Постановка и декомпозиция задачи календарного планирования ремонтов и работы конвертеров сталеплавильного производства / И. М. Прохоров, А.В. Зимин, И.В. Буркова, В.В. Зимин // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – №2(96) – С. 38–40.
2. Прохоров И. М., О процедуре решения задачи построения расписания ремонтов конвертеров сталеплавильного цеха с двумя агрегатами / И. М. Прохоров, А.В. Зимин, И.В. Буркова, В.В. Зимин // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – №2(96) – С. 64–67.
3. Зимин, В. В. Построение согласованных расписаний для производственных звеньев комплекса «сталь-прокат»: дис. канд. техн. наук 05.13.06. – Москва, МИСиС, 1979. – 219с.
4. Lohmer J., Lasch R. Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review// International Journal of Production Research, 2021, vol. 59(7), pp. 2028-2054.
5. Moghaddam M., Moosavi E. A view on recent developments for production scheduling optimization// Proc. of the 26th Int. Mining Congr. and Exhibition of Turkey (IMCET 2019), 2019, pp. 166-173.
6. Li Y., Goga K., Tadei R., Terzo O. Production Scheduling in Industry 4.0. In: Barolli L., Poniszewska-Maranda A., Enokido T. (eds) // Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, vol. 1194, Springer, Cham.

# УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РАЗВИТИЕМ АВИАСТРОЕНИЯ И ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ

Клочков В.В.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
vlad\_klochkov@mail.ru

*Аннотация. Рассматриваются примеры влияния активного характера социально-экономических систем на возможности и последствия внедрения новых технологий в авиастроении. Изучены препятствия к внедрению новых технологий и механизмы их преодоления, а также риски нежелательных последствий внедрения технологий, обусловленные активным характером управляемых систем.*

*Ключевые слова: управление технологическим развитием, авиастроение, риски, эффективность, активные системы, механизмы внедрения, математические модели.*

## **Введение**

Управление научно-технологическим развитием высокотехнологичных отраслей и экономики в целом включает в себя прогнозирование и стратегическое планирование развития технологий, организацию их разработки, стимулирование их внедрения, мониторинг результативности этих процессов. Поскольку технологии создаются и применяются в больших организационно-технических и социально-экономических системах, необходимо непосредственно учитывать активный характер этих систем. В них действуют разнообразные акторы – индивиды, предприятия и организации, государства, иные общности, обладающие различными интересами. Технологии непосредственно затрагивают эти интересы и, с одной стороны, определяют возможности и ограничения действующих субъектов, а с другой стороны, само создание и применение технологий зависит от воли и действий этих субъектов.

Известны примеры, когда противодействие отдельных субъектов, не заинтересованных во внедрении новых технологий, практически блокировало их внедрение, даже если с точки зрения общественной, суммарной полезности эти новые технологии были эффективны. Т.е. препятствием явилась ограниченная рациональность субъектов, их неспособность оценить общий выигрыш, а также несовершенство институциональных механизмов, которые могли бы перераспределить часть этого выигрыша в пользу «пострадавших» и незаинтересованных субъектов. Также известно множество примеров того, что действия активных субъектов приводили к результатам внедрения новых технологий, прямо противоположным ожидавшимся, или, по крайней мере, существенно ослабляли ожидаемый полезный эффект.

Можно сказать, что технологии «преломляются» в организационно-технических и социально-экономических системах, и реальные результаты создания и внедрения технологий существенно зависят от интересов и действий активных субъектов. Новые технологии ни в коем случае нельзя рассматривать механистически, лишь как новые значения коэффициентов в балансовых моделях. Действуют сложные обратные связи между изменениями в техносфере и в социально-экономических системах. В работах специалистов по экономике инноваций такие обратные связи между обществом (причем, неоднородным, состоящим из различных групп) учитываются в той или иной мере, даже говорится о коэволюции общества с его институтами и техники, технологий [1, 2].

Причем, зачастую преобразования в техносфере и в «ответной части» социально-экономических систем должны происходить одновременно и согласованно – иначе новые технологии не принесут ожидаемых положительных эффектов, т.е. необходимо одновременно оптимизировать и технику, и «ответную часть» - институты общества, бизнес-процессы экономических субъектов. Такой подход к прогнозированию и стратегическому планированию технологического развития авиации и авиастроения развивается в НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» как методология анализа и синтеза интегрированных авиационных систем, ИАС [3]. Поскольку требуется одновременное изменение технологий в отрасли-производителе техники и в «ответной части», как правило, оно может реализоваться только целенаправленно, контролируемым, а не стихийным образом, как правило – при централизованном, чаще всего, государственном управлении. Отсутствие таких согласованных, скоординированных изменений может блокировать внедрение даже весьма эффективных (с общественной точки зрения) технологий и организационных решений. Таким образом, еще одна важная функция управления научно-технологическим развитием – координация внедрения новых технологий и институциональных преобразований.

В этой работе будут рассмотрены конкретные примеры влияния активного характера социально-экономических систем на процессы и результаты внедрения новых технологий в авиастроении и некоторых других отраслях и областях техники.

## **1. Влияние активного характера организационно-технических систем на возможность и эффективность внедрения новых технологий**

Недостаточный учет воли активных субъектов, их интересов приводит к провалу попыток создания и внедрения потенциально эффективных (с общественной точки зрения) новых технологий, либо к результатам их внедрения, кардинально отличающимся от ожидавшихся изначально, к ошибкам в прогнозировании и планировании научно-технологического развития. Во избежание таких ошибок необходимо включать в прогнозные модели обратные связи между технологическими возможностями и поведением активных субъектов.

### **1.1. Эффект рикошета, условия и последствия его проявления**

В этом разделе рассмотрен весьма распространенный и практически значимый пример «инверсии», когда результаты внедрения технологий оказываются противоположны ожидаемым, причем, именно по причине активного характера социально-экономических систем, в которых внедряются новые технологии.

Одним из главных направлений развития технологий в транспортном машиностроении, энергетике, ряде других отраслей на всем протяжении их истории является сокращение энергоемкости, конкретнее говоря, удельного расхода топлива или энергии в ином виде на единицу полезной работы. Это направление развития приоритетно, поскольку удельный расход топлива, во-первых, оказывает решающее влияние на экономические характеристики, на себестоимость единицы полезной работы, на доступность соответствующих благ. Во-вторых, эта же величина во многом определяет и экологические характеристики техники, поскольку как расходование, так и добыча, производство, транспортировка, хранение топлива создает выбросы вредных веществ. Многие виды топливных ресурсов относятся к практически невозобновляемым (по крайней мере, на временных интервалах, соответствующих периоду их разработки). Поэтому сокращение расхода таких ресурсов представляется необходимым во избежание коллапса соответствующих отраслей по причине исчерпания запасов.

На первый взгляд, снижение удельного расхода ресурсов однозначно приводит и к сокращению их совокупного потребления, что благотворно и с социально-экономической точки зрения, и с экологической. Однако в реальности результат внедрения таких инноваций неоднозначен. При внедрении ресурсосберегающих технологий нередко получается результат, обратный ожидаемому, по следующей причине. При сокращении удельного расхода ресурсов, соответствующие блага становятся доступнее, спрос на них возрастает, причем, иногда в такой степени, что совокупное потребление ресурсов увеличивается. Этот эффект, называемый эффектом рикошета, неоднократно наблюдался в различных отраслях. Одно из первых упоминаний о нем принадлежит известному британскому экономисту Уильяму Стэнли Джевонсу, см. [4], поэтому данный эффект еще известен как парадокс Джевонса. В работе «The Coal Question», вышедшей в 1865 г., он отметил, что наблюдавшееся в XIX веке существенное повышение экономичности паровых машин (переход от машины Ньюкомена к машине Уатта), работавших на угле, вопреки ожиданию, привело не к снижению, а к бурному росту спроса на уголь, и привел к качественному объяснению этому «парадоксу». Можно привести множество примеров проявления данного эффекта на всем протяжении технологического развития человечества.

Следует подчеркнуть, что эффект рикошета проявляется не только в отношении «платных» ресурсов, но и в отношении экологических внешних эффектов. Сам термин «эффект рикошета» (rebound effect) в узком смысле возник именно в эколого-экономических исследованиях, см. [5]. Снижение удельных выбросов нередко (но не всегда!) сопряжено с сокращением расходования «платных» ресурсов. Т.е. экологический внешний эффект некоторым образом увязывается с издержками его производителя, и происходит его интернализация. Так, например, совершенствование тепловых двигателей приводит, с одной стороны, к снижению удельного (на единицу мощности) расхода топлива, а с другой – к снижению эмиссии CO<sub>2</sub>, уменьшению выбросов несгоревших остатков топлива (сажи и т.п.). Поэтому при повышении экологической чистоты техники она может стать экономичнее, причем, настолько, что суммарное потребление ресурсов (и, соответственно, объем выбросов) даже возрастет. Таким образом, даже однозначно желательные, на первый взгляд, инновации, в силу описанного эффекта и подобных ему могут приводить к последствиям, прямо противоположным ожидаемым.

Проведенный в работе [6] экономико-математический анализ структурных (т.е. учитывающих расслоение населения по доходам и дифференцированное потребительское поведение отдельных доходных групп) моделей спроса на блага различных категорий – первой необходимости, второй необходимости (причем, более или менее качественные – например, перевозки в дальнем сообщении железнодорожным и воздушным транспортом), предметы роскоши – показал, что индивидуальный эффект рикошета (для отдельного потребителя) может проявляться, когда потребитель «переключается» на потребление благ, обладающих более высокой стоимостной ресурсоемкостью, т.е. долей стоимости ресурсов в цене блага, чем потреблявшиеся ранее. Наивысший риск проявления данного эффекта возникает при снижении ресурсоемкости благ высококачественных благ второй необходимости и

предметов роскоши, однако он не исключен и при снижении ресурсоемкости современных технологий удовлетворения базовых потребностей (в благах первой необходимости).

Глобальный эффект рикошета, т.е. рост потребления ресурсов всей совокупностью потребителей, имеет место только тогда, когда соответствующая группа потребителей («группа риска», с точки зрения индивидуального эффекта рикошета) является относительно многочисленной и/или индивидуальный эффект рикошета для ее представителей относительно силен, при сложившихся значениях цен на ресурсы и прочих слагаемых цены благ. Вследствие глобального эффекта рикошета, несмотря на снижение ресурсоемкости благ, суммарное потребление ресурсов может существенно возрасти при их эластичном предложении, т.е. ресурсосберегающие инновации могут быть системно неэффективными. Фактически это и наблюдается на протяжении десятилетий развития мировой гражданской авиации. Многократное, в 4-5 раз по сравнению с реактивными пассажирскими самолетами первого поколения, сокращение удельного расхода топлива на пасс.-км и многократное же удешевление авиаперевозок (причем, в реальном выражении) привели к росту их объема почти на 3 порядка (с 70 млн. пасс. в 1960 г. до более чем 4,5 млрд. пасс. в докризисном 2019 г.) – благодаря «переключению» пассажиров на воздушный транспорт с наземного и водного, а также их «переключению», например, на туризм с других видов досуга. Всё перечисленное привело к существенному росту совокупного потребления авиатоплива и совокупного объема вредных выбросов от мировой гражданской авиации. Если же предложение ресурсов неэластично, их удорожание (вследствие роста спроса) ослабит ожидаемый прирост доступности ресурсоемких благ для целевой группы потребителей и/или порождает отрицательные внешние эффекты для прочих потребителей, т.е. инновации окажутся социально неэффективными. Эти виды рисков внедрения ресурсосберегающих технологий определяются не только технологическими параметрами, но и социально-экономической ситуацией.

Можно утверждать, что в широком смысле эффекты рикошета сопровождают внедрение большинства новых технологий, поскольку они все нацелены на экономию тех или иных, иногда неочевидных, «ресурсов». Приведем некоторые примеры:

- улучшение транспортных технологий привело к существенному росту подвижности населения (как в дальнем сообщении, так и в местном) и активизации грузоперевозок, вследствие чего, по меньшей мере, не сократились или даже возросли доли транспортных издержек в затратах предприятий (более того, сами бизнес-модели стали более ориентированными на активную кооперацию и обмен потоками грузов) и время, которое люди проводят в дороге;
- повышение емкости носителей информации (практически на три порядка за десятилетие) открыло возможности лавинообразного повышения среднего объема файлов (за счет роста качества изображений и т.п.);
- развитие технологий сельского хозяйства, переход к земледелию и животноводству от охоты и собирательства, радикально увеличил ресурсные возможности обеспечения человечества продовольствием и открыл возможность радикального роста его численности, вследствие чего и в новейшей истории весьма остро стоят проблемы продовольственных кризисов и их разрешения;
- развитие энергетических и строительных технологий отопления и кондиционирования, теплоизоляции и т.п. способствовало массовому освоению и заселению территорий с суровым (как холодным, так и экстремально жарким) климатом, вследствие чего затраты на адаптацию к этим условиям не сократились, как это ожидалось.

Появление новых технологических возможностей преодоления каких-либо ограничений и проблем приводит к усилению активности в соответствующих областях, вследствие чего эти проблемы и ограничения не только не исчезают, но могут и усиливаться. При этом, как правило, благосостояние большинства людей возрастает, т.е. обсуждаемые технологии отнюдь не были бесполезными или вредными. Но ожидания, что новые технологии позволят снять определенные проблемы, как правило, не оправдываются. Активные социально-экономические системы, действуя оптимальным (или, по крайней мере, целенаправленным и рациональным) образом, используют новые возможности максимально полно, подобно тому, как газ заполняет весь отведенный ему объем. Возможно, это проявление некоторых фундаментальных свойств активных систем.

## 1.2. Влияние частных экономических интересов на формирование типажа парка воздушных судов гражданской авиации

После распада СССР отечественная гражданская авиация, весьма развитая по мировым меркам (например, объем перевозок только на территории современной России к 1990 г. достиг 91 млн. пасс. в год, что соответствовало средней авиационной подвижности населения около 0,6 полета на человека в год, т.е. на уровне передовых авиационных держав на тот момент), подверглась деградации. Объем перевозок и пассажирооборот сократились в 3-4 раза. И если в советской авиатранспортной системе были развиты местные и межрегиональные перевозки, которые связывали прямыми рейсами областные, краевые и республиканские центры (три четверти всех перелетов совершались по региональным и местным маршрутам, и только четверть поездов – через московский авиационный узел, МАУ), то в новой

экономической реальности пассажиропотоки на большинстве таких маршрутов перестали оправдывать выполнение рейсов с приемлемой регулярностью. Обвальное падение покупательной способности населения и перевод авиаперевозок на рыночное финансирование привели к практически полному коллапсу местных и межрегиональных авиалиний, которые в СССР масштабно дотировались (в т.ч. и перекрестным образом – за счет рентабельных магистральных и международных рейсов, путем перераспределения средств внутри единой авиакомпании «Аэрофлот»). При этом упал и фактический спрос на прямые межрегиональные перевозки по причинам распада единых хозяйственных комплексов – например, отраслевого подчинения, и в целом усиления «москвоцентричности» страны, централизации хозяйственных, культурных, административных связей. Можно утверждать, что после распада СССР регионы России стали «менее интересны друг другу», по сравнению с Москвой.

В итоге и после восстановления российской гражданской авиации, закончившегося к 2019 г. выходом на показатели объемов перевозок, превысившие советский уровень, связанность маршрутной сети осталась неудовлетворительной. Для нее характерна сверхцентрализация: в 2018 г. около 75% перевозок выполнялось через аэропорты МАУ. Государственным органам власти приходится принимать особые решения по децентрализации маршрутной сети, стремясь к повышению качества авиатранспортных услуг, сокращению длительности перелетов и количества пересадок, существенно снижающих комфорт пассажиров. Выполнение не менее 53,7%-54%% перевозок минуя МАУ к 2030-2035 гг. задано как целевой показатель в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 года. Восстановлению прямых межрегиональных маршрутов способствуют и новые целевые установки государства по обеспечению качества транспортного обслуживания. Например, в вышеупомянутой Транспортной стратегии установлено требование к 2035 году обеспечить время в пути между всеми городами Российской Федерации с населением более 100 тыс. чел. не более 12 часов, а время в пути до муниципального центра к 2030 и к 2035 году должно составлять не более 2,5 и 2 часов соответственно. Фактически такие стандарты качества транспортного обслуживания требуют перехода к прямым перевозкам по многим межрегиональным направлениям (а также развития сети местных воздушных линий в регионах).

При этом в нынешнем парке ВС российских авиакомпаний преобладают среднемагистральные самолеты двух наиболее распространенных в мире семейств – Boeing-737 и Airbus A319/320/321 вместимостью около 150-200 мест. Их характеристики почти оптимальны для сверхцентрализованной авиатранспортной системы РФ с мегахабом в МАУ, поскольку пассажиропотоки из центров субъектов Федерации в Москву и обратно достаточны для загрузки таких самолетов при соблюдении высокой, минимум ежесуточной частоты рейсов. Но при переходе к прямым межрегиональным рейсам для обеспечения аналогичной частоты на большинстве направлений потребуются ВС гораздо меньшей вместимости – до 30-40 мест, причем, при сохранении скорости и комфорта ближне- и среднемагистральных самолетов и при умеренном удорожании перевозок, в расчете на пассажиро-километр. Создание таких ВС представляет собой масштабный вызов для авиастроения. В то же время ведущие российские авиакомпании не проявляют заинтересованности в таком изменении структуры парка и маршрутной сети. Фактически, сложившаяся структура авиатранспортной системы позволяет им получать двойной доход от перевозок жителей регионов России в МАУ, а затем из МАУ – в желаемые пункты назначения. Разумеется, это снижает качество авиатранспортных услуг, увеличивая время в пути, количество пересадок и т.п. Однако в отсутствие жесткого механизма контроля требований, направленных на восстановление прямых межрегиональных перевозок, описанная стратегия становится доминирующей для коммерческих авиакомпаний, нацеленных на максимизацию прибыли – в т.ч. и в ущерб интересам пассажиров и качеству их обслуживания.

Интересно также влияние сложившейся в современной России практики финансирования разработки новых типов гражданских ВС на их типаж и характеристики. Разнообразные расчеты, моделирование и оптимизация авиатранспортной системы Российской Федерации (по критерию минимума затрат при соблюдении стандартов качества обслуживания) однозначно диктуют целесообразность сокращения пассажироместности ВС в большинстве классов. Это объективно обусловлено географической, демографической и социально-экономической спецификой страны – большими расстояниями и малой плотностью населения на большей части территории, относительно низкой покупательной способностью населения и ограниченными возможностями дотирования авиаперевозок из госбюджета, и, как следствие – низкой интенсивностью потоков на большинстве направлений, что в сочетании с современными требованиями по частоте рейсов однозначно определяет малое количество пассажиров на борту («маленькая страна с большими расстояниями»). Но, несмотря на это, российские авиастроительные корпорации, создавая новые образцы гражданской авиационной техники (причем, за государственный счет и по государственному заказу, что порождает особые эффекты оппортунистического поведения, подробнее рассмотренные в работе [7]), стремятся разрабатывать ВС максимальной пассажироместности из возможных в соответствующих классах (например, для легких ВС местных воздушных линий она ограничена 9 местами для одномоторных ВС и 19 местами для двухмоторных). В значительной степени такие стратегии обусловлены сложившейся практикой нормативного



ценообразования опытно-конструкторских работ, ОКР, которое осуществляется по затратному принципу – и не имеет отношения к реальной эффективности ВС в составе авиатранспортной системы страны (тем более не предполагается коммерческая окупаемость проектов и реальная конкурентоспособность новых ВС для авиакомпаний-потребителей). Несмотря на то, что официальных нормативов оценки трудоемкости и стоимости разработки новых ВС в этой сфере в настоящее время не существует, в реальности сохраняется инерция принципов, заложенных еще в советское время. Согласно им (см., например, эконометрические модели, приведенные в [8]), трудоемкость и стоимость разработки образца авиационной техники возрастают с ростом его массогабаритных характеристик – разумеется, с поправкой на коэффициенты новизны и сложности. И при волонтаристском обосновании проектов и их стоимости однозначно проще обосновать увеличение стоимости ОКР для более крупных и тяжелых изделий.

Известны и примеры блокирования внедрения новых технологий и образцов авиационной техники по причинам незаинтересованности в этом рядового персонала, «сопротивления снизу». Так, в 1974 г. по заказу и под руководством советской стороны в Польше был создан специализированный сельскохозяйственный самолет М-15, отличавшийся целым рядом новых (и даже революционных) технологических решений. Он был призван заменить широко известный самолет Ан-2 в сегменте авиахимических работ (АХР), и был изначально оптимизирован для их проведения. В частности, принятые конструкторами инновационные решения обеспечивали улучшенное распыление препаратов, более результативное их применение в расчете на килограмм вносимых химикатов. Также он обладал и многократно большей производительностью в килограммах на час полета. Что касается технико-экономических характеристик, высокий расход керосина М-15 в указанный период (при низкой цене топлива) еще не был критическим недостатком. Несмотря на высокие летно-технические характеристики и уровень безопасности полетов, М-15 встретил сильное сопротивление в советской сельхозавиации, что и стало решающей причиной малой серийности его выпуска и короткого периода эксплуатации выпущенных изделий. На основную причину такого сопротивления (помимо технологической новизны, которая неизбежна при появлении любой новой модели, и требует повышенных усилий эксплуатирующих организаций) указывают авторы статьи [9], которые непосредственно участвовали в создании и освоении эксплуатации М-15. Традиционно применяемый в сельхозавиации Ан-2 является универсальным самолетом, обладает вместительным грузопассажирским салоном, что позволяет, помимо выполнения официальных работ, оказывать широкий спектр услуг, в т.ч. теневых. Кроме того, уже в указанный период важным материальным стимулом для экипажей сельхозавиации была возможность (на фоне нараставшего дефицита многих продуктов питания в официальной торговле) получить по итогам АХР вознаграждение в натуральной форме – т.е. увезти на аэродром базирования до тонны высококачественных фруктов или овощей. Оптимизированный исключительно для АХР самолет М-15, вообще не обладавший грузовой или пассажирской кабиной (вся грузоподъемность использовалась для перевозки химикатов в баках), таких возможностей не предоставлял.

## **2. Организационные проблемы и механизмы внедрения интеллектуальных технологий управления в авиации**

Технологии искусственного интеллекта, ИИ, относятся к «сквозным» технологиям нового технологического уклада. Ожидается, что именно они позволят радикально повысить качество управления техническими и организационно-техническими системами, в т.ч. быстродействие и точность выработки решений, сократить трудоемкость анализа информации и выработки решений, частоту и тяжесть ошибок операторов и лиц, принимающих решения, ЛПР. Т.е. ожидается, что технологии ИИ позволят радикально повысить как целевую эффективность управляемых систем, так и уровень их безопасности. Технологии ИИ признаны приоритетным направлением технологического развития в сфере управления и в авиации, причем, как мировой, так и российской, с учетом ее специфики (в т.ч. на современном этапе ее развития, с учетом санкционного давления, вынужденной автаркии и проблем поддержания летной годности разнородного малочисленного парка, в т.ч. без поддержки со стороны разработчиков и производителей). В авиастроении планируется применение технологий ИИ в процессах управления на всех уровнях:

- оперативном (собственно автоматизация управления движением и функционированием объектов, в т.ч. переход к беспилотной авиации, повышение уровня ее автономности, а также интеллектуальная поддержка экипажей, диспетчеров и т.д.);
- тактическом (управление состоянием и использованием объектов, в т.ч. на основе индивидуального мониторинга и интеллектуального прогнозирования их состояния, предиктивной диагностики);
- стратегическом (т.е. при принятии проектных и организационных решений в крупномасштабных системах – авиатранспортных, авиапромышленных и т.п. – с учетом скрытых угроз и возможностей

повышения уровня безопасности полетов, выявляемых путем интеллектуального анализа больших массивов данных о событиях, касающихся безопасности полетов);

Как показывает опыт внедрения отдельных элементов рассматриваемых здесь прогрессивных технологий, далеко не всегда они успешно внедряются в практике проектирования и производства новых образцов авиационной техники, АТ, эксплуатации АТ в эксплуатирующих организациях, в сфере технического обслуживания и ремонта (ТОиР) АТ, в управлении воздушным движением и в других сферах авиационной деятельности. Несмотря на то, что в целом на уровне авиатранспортной системы, АТС внедрение таких технологий может приносить значительный положительный эффект, в т.ч. экономический, при неухудшении или повышении уровня безопасности полетов, отдельные субъекты – организации-участники жизненного цикла АТ и поставщики услуг, отдельные подразделения этих организаций и конкретные лица, а также третьи лица – могут быть не заинтересованы во внедрении этих технологий и связанных с ним изменениях. Они могут иметь отрицательные стимулы к внедрению интеллектуальных технологий, опасаться разнообразных рисков. Внедрение любых прогрессивных технологий должно стать взаимовыгодным для всех заинтересованных сторон. И соответствующие организационные механизмы нуждаются в объективном анализе, в т.ч. путем математического моделирования.

В рамках разработки математических моделей организационных механизмов внедрения авиационных технологий в обеспечение приемлемого уровня безопасности полетов и общей стоимости владения изделиями АТ в рамках ИАТС для каждой из трех вышеописанных групп интеллектуальных авиационных технологий решены следующие задачи:

- анализ организационных проблем внедрения интеллектуальных авиационных технологий;
- формализация и качественное обоснование организационных механизмов внедрения интеллектуальных авиационных технологий;
- анализ их эффективности с помощью математических моделей.

## 2.1. Организационные проблемы и механизмы внедрения технологий интеллектуальной автоматизации управления функционированием объектов и выполнением миссий

Глубокая автоматизация управления движением транспортных средств и функционированием их систем чрезвычайно желательна с экономической точки зрения (сокращая затраты на экипаж, особенно весомые при малых полезных нагрузках). Она необходима для развития различных беспилотных систем, а также для «демократизации» пилотируемых транспортных средств, которые могут стать массовыми лишь при условии, что управление ими будет доступно широкому кругу людей с обычными способностями. Это уже произошло с легковыми автомобилями, но применительно к авиации лишь предстоит. Управление легкими ВС авиации общего назначения (АОН) должно стать доступным практически каждому относительно здоровому человеку, вероятно, за счет интеллектуальных «помощников» экипажа. Что касается широкого применения беспилотных авиационных систем, БАС, в авиоперевозках и выполнении авиационных работ, оно возможно лишь при условии полной автоматизации управления их движением и выполнением миссий.

Несмотря на значительную социально-экономическую целесообразность и даже готовность многих необходимых технологий, внедрение глубокой автоматизации управления движением транспортных средств встречает сильное сопротивление общества и государственных органов управления. Они опасаются – и вполне оправданно – возможной некорректной работы автоматизированных, тем более, автоматических систем управления, возрастания частоты и количества вызванных этим аварий и катастроф. Один из главных вопросов при создании и внедрении таких технологий и систем управления – это вопрос ответственности в случае аварии или катастрофы с таким автоматическим или автоматизированным транспортным средством. Несет ли ответственность за последствия его владелец, либо, разработчик и производитель, либо сами третьи лица, которые в принципе также могут быть виновны, как и в случае происшествий с обычными, пилотируемыми транспортными средствами?

Была рассмотрена следующая гипотеза. Поскольку в начальный период внедрения таких технологий будут весьма частыми сбои и ошибки, вызванные именно конструктивно-производственными недостатками техники, алгоритмов управления ею и т.п., в этот период разработчики и производители могли бы априорно принимать ответственность за все происшествия и инциденты на себя. Это позволяет избежать лишних транзакционных издержек установления ответственности в каждом конкретном случае, а также повысить доверие потребителей и третьих лиц, снизив сопротивление общества внедрению автоматизированных транспортных средств. В свою очередь, благодаря этому, а также благодаря высвобождению ресурсов у эксплуатантов, быстрее будет нарастать численность парка изделий и накапливаться опыт их эксплуатации, и, в конечном счете, ошибки быстрее будут исправляться. При этом возможно даже, что суммарная прибыль за жизненный цикл у разработчика и производителя автоматизированных транспортных средств окажется выше, чем если бы он с самого начала эксплуатации настаивал на определении виновных в каждом происшествии и инциденте.

Описанные качественные предпосылки были формализованы в математической модели [10], с помощью которой были проведены параметрические расчеты для гипотетических, но реалистичных примеров развития БАС городской и пригородной аэромобильности (аэротакси) и БАС для доставки грузов и почты «последней мили». Сравнение сценариев развития отрасли БАС показывает, что при формировании интегрированной авиационной системы, ИАС, в которой авиапроизводитель на начальном этапе внедрения новой высокоавтоматизированной АТ априорно принимает на себя ответственность за все ее отказы и их последствия, суммарно накопленная прибыль в отрасли будет существенно больше, чем в отсутствие ИАС. Эффект достигается за счет того, что при априорном принятии ответственности:

- из затрат отрасли исключаются «лишние» затраты, связанные с установлением ответственности за причину отказов;
- происходит более быстрое накопление опыта эксплуатации, что позволяет быстрее создавать и внедрять более безотказные изделия АТ, тем самым увеличивая выручку.

Основными факторами, способствующими ускорению роста отрасли, являются величина стартового заказа серийных изделий АТ (как наиболее значимый параметр), возможный налет/наработка изделий АТ в единицу времени, и доля прибыли, выделяемой эксплуатантом на закупку новых изделий.

С целью ускоренного роста отрасли, возможными способами формирования ИАС являются:

- создание единого оператора отрасли (которым может быть государство);
- добровольное принятие на себя производителем функций ИАС.

В последнем случае производителем может быть поставлена задача максимизации собственной прибыли за счет принятия соответствующей стратегии: на начальном этапе эксплуатации новой АТ – брать всю ответственность на себя, на последующем этапе – только за отказы вследствие КРН. При этом, безусловно, суммарно накопленная прибыль в отрасли будет меньше, однако такая стратегия позволит, как и в случае централизованной ИАС, быстро преодолеть период «детских болезней» новой АТ, связанных с ее конструктивными недостатками, тем самым уменьшить количество отказов при переходе к широкомасштабной эксплуатации этой АТ.

## 2.2. Организационные проблемы и механизмы внедрения технологий индивидуального управления состоянием объектов на основе интеллектуального мониторинга и прогнозирования их состояния

На тактическом уровне управления состоянием и использованием объектов авиатранспортных систем – например, изделий АТ – весьма перспективными являются технологии индивидуального управления состоянием объектов. Применительно к АТ подразумевается эксплуатация по техническому состоянию, ЭТС, вместо эксплуатации всего парка однотипных изделий по «твердому» ресурсу. Поскольку индивидуальные условия эксплуатации различных экземпляров изделий АТ могут существенно различаться по «жесткости», интенсивности нагружения и накопления повреждений, даже при стабильном качестве изготовления со временем индивидуальный «запас прочности» изделий в парке различается всё сильнее, и постепенно для отдельных изделий состояние приближается к предотказному. В то же время большая часть парка может быть весьма далека от него, и могла бы безопасно эксплуатироваться и далее. Но по соображениям безопасности единый, вероятностно обусловленный ресурс для изделий в парке устанавливается перестраховочным образом, по наиболее нагруженным экземплярам. При наличии технологий и средств индивидуального мониторинга и прогнозирования технического состояния изделий АТ можно было бы эксплуатировать изделия гораздо эффективнее и экономичнее, причем, не в ущерб безопасности. Соответствующие технологии индивидуального мониторинга состояния объектов кратко обозначим ТИМС.

Внедрение ТИМС позволяет эксплуатанту реже производить операции ТОиР по сравнению с едиными для всего парка регламентными сроками, сократить объем необходимых операций ТОиР, запчастей, а также уменьшить число потребных запасных изделий для поддержания необходимого уровня готовности парка. Благодаря этому удастся снизить издержки эксплуатанта на ТОиР, а также лизинговые затраты. Построены соответствующие компьютерные модели, позволяющие оценить достижимые сокращения объемов ТОиР, лизинга сменных изделий, приобретения новых изделий АТ.

Однако, при неизменных ценах на АТ и ее ТОиР, внедрение ТИМС категорически невыгодно разработчикам и производителям АТ. Сокращается объем поставок новой АТ, ее ТОиР, кроме того, разработка и внедрение ТИМС требуют дополнительных затрат от разработчиков и производителей. Во многом по этим причинам формально выгодные технологии обеспечения эксплуатации АТ по состоянию не внедряются на протяжении десятилетий, несмотря на их готовность, доказательство безопасности и т.п. Преодолеть это объективное препятствие помогут два возможных организационно-экономических механизма, рассмотренных в работе [11].

Во-первых, цены на более долговечную, в среднем, технику и ее ремонт можно повысить в некотором взаимовыгодном диапазоне, в котором и прибыль поставщика АТ и ТОиР возрастет, окупая затраты на разработку и внедрение ТИМС, и эксплуатационные затраты на ТОиР и поддержание готовности парка

сократятся. Определены диапазоны взаимовыгодных цен, при которых после введения ТИМС не убывает прибыль поставщика и не возрастают затраты эксплуатанта. Также определены условия, при которых разработка и внедрение ТИМС в принципе не были бы экономически выгодны сторонам (при малом приросте средней межремонтной наработки, не превышающем некоторого порога).

Во-вторых, вместо продажи АТ и ее ТОиР, можно перейти к продаже единиц использования АТ – например, летных часов, по некоторым фиксированным ставкам, с обязательствами обеспечить заданный уровень готовности парка. Тогда повышение средней долговечности АТ и сокращение затрат на ТОиР уже приводит к снижению затрат самого поставщика таких комплексных услуг, автоматически обеспечивая его заинтересованность во внедрении ТИМС.

Однако подобные контракты с фиксированной ставкой за летный час по своей природе являются страховыми, со всеми свойственными им рисками. Предложены модели расчета взаимовыгодных ставок оплаты АТ и ТОиР за летный час, обеспечивающих для эксплуатантов сокращение ожидаемых затрат и рисков, а для поставщиков – повышение ожидаемой прибыли и, опять же, снижение рисков, стабилизацию денежных потоков для обеих сторон.

В этой сфере также проявляются общие эффекты, свойственные всем страховым контрактам. С одной стороны, при объединении множества однородных застрахованных клиентов в пул, согласно известным вероятностным закономерностям, снижается риск, и появляется возможность снизить взаимовыгодную страховую ставку. Но, с другой стороны, любые реальные клиенты – эксплуатанты – неоднородны, и обладают различными характеристиками условий эксплуатации и реальной средней долговечности АТ, рисков отказов и т.п. Поэтому объединение клиентов в пул с одинаковой ставкой оплаты за летный час должно быть взаимовыгодным: снижение общей ставки за счет объединения в пул для самых «благополучных» эксплуатантов должно преобладать над приростом средних затрат на ТОиР и поддержание готовности парка у наименее «благополучных». Модельные расчеты с использованием реалистичных параметров российских региональных авиакомпаний показали, что при долгосрочном контракте (20 лет) объединение различных эксплуатантов в пул позволяет предложить всем эксплуатантам единую ставку летного часа на уровне ставки для регионов с наиболее благоприятными условиями эксплуатации или немного ниже. При краткосрочном контракте (5 лет) переход на фиксированную ставку оплаты ТОиР за летный час может способствовать снижению рисков эксплуатантов и поставщика. При объединении в пул авиакомпаний, эксплуатирующих парк АТ как в благоприятных, так и в неблагоприятных условиях, формируется единая ставка летного часа ниже, чем таковая для изолированных регионов.

### 2.3. Организационные проблемы и механизмы внедрения технологий выявления скрытых угроз безопасности полетов на основе интеллектуального анализа больших массивов данных

На верхнем, стратегическом уровне управления интеллектуальные технологии анализа больших массивов данных позволяют, на основе анализа разнородных данных – от бортовых измерений параметров полета ВС и функционирования их систем до вербальной информации о событиях, связанных с безопасностью полетов, поступающей от экипажей ВС, диспетчеров управления воздушным движением, УВД, ремонтно-эксплуатационного персонала и т.п. – выявлять неочевидные на стадии проектирования системные проблемы и угрозы, скрытые взаимосвязи факторов опасности. Это, в свою очередь, позволяет принимать более эффективные стратегические решения – проектные, в области конструкции АТ и авиатранспортной системы, АТС, в целом, а также организационные, в области режима труда и отдыха персонала, его обучения, организации летной работы и т.д.

Причем, для выявления таких скрытых угроз и возможностей повышения безопасности полетов и эффективности авиатранспортной системы особо значима, помимо «приборной», объективно измеряемой информации, именно информация, поступающая от авиационного персонала, так называемых добровольных донесений. На них в значительной степени и основаны организационные системы управления безопасностью полетов, СУБП, в гражданской авиации. Как правило, большинство предпосылок к авиационным происшествиям и инцидентам остается на уровне событий малого уровня тяжести последствий, усложнения условий полета. УУП, или событий без последствий. В то же время информация о них значима, и ее аналитическое обобщение на уровне всей АТС (которое и стало возможным благодаря технологиям анализа больших данных) позволяет раньше выявлять скрытые угрозы, избегая перехода предпосылок в собственно авиационные происшествия с тяжелыми последствиями. Но авиационный персонал может скрывать подобную информацию, опасаясь наказания за те или иные формальные нарушения. И, с одной стороны, эти наказания призваны повысить дисциплину авиационного персонала, стимулируя выполнение требований безопасности полетов, но, с другой стороны – блокируют благотворный механизм добровольных сообщений, помогающих выявлять скрытые системные угрозы, повышая уровень безопасности полетов в АТС.

Разработана математическая модель [12] рационального баланса двух организационных механизмов:

- декриминализации событий, относящихся к безопасности полетов, при условии добровольного предоставления информации о них в СУБП соответствующего уровня,
- стимулирования соблюдения авиационным персоналом и организациями-поставщиками услуг правил, направленных на обеспечение безопасности полетов.

Учитывается динамика постепенного выявления и устранения системных угроз безопасности полетов, «обучения» СУБП в течение жизненного цикла АТС с заданным обликом, составом используемых технологий, конструктивными и организационными решениями. Обосновано, что оптимальная (по критерию минимума ожидаемого за период планирования количества событий, относящихся к безопасности полетов, с тяжелыми последствиями) программа управления в описанной системе имеет кусочно-линейный вид:

- до некоторого момента «переключения», который и является предметом оптимизации, события, относящиеся к безопасности полетов, полностью декриминализованы (или даже вводится стимулирование добровольного предоставления информации о них);
- начиная с момента «переключения» вводится штраф за нарушения правил, направленных на обеспечение безопасности полетов.

Исследована зависимость оптимального момента переключения от параметров модели, в т.ч.

- от тяжести последствий событий, относящихся к безопасности полетов,
- от доли событий с тяжелыми последствиями (и, соответственно, предпосылок к таким событиям),
- а также от темпов «обучения» СУБП, т.е. выявления и устранения системных угроз безопасности полетов.

Показано, что последняя зависимость немонотонна: при очень высоких и очень низких темпах обучения целесообразно сразу или почти сразу переходить к жесткому наказанию за нарушения, поскольку в этих случаях декриминализация и добровольные сообщения о нарушениях не позволят значительно повысить безопасность полетов. Выработаны рекомендации по рациональному регулированию нарушения авиационным персоналом и организациями-поставщиками услуг правил, направленных на обеспечение безопасности полетов, на протяжении жизненного цикла ИАТС, для обеспечения эффективного выявления скрытых угроз безопасности полетов на основе интеллектуального анализа больших массивов данных и последующего устранения этих угроз.

### **3. Заключение**

С одной стороны, достижения и методологические подходы ТАС актуальны при планировании, прогнозировании НТР, решении иных задач управления НТР, поскольку и создание технологий (чему посвящен отдельный массив работ, подробнее см., например, [13]), и их внедрение происходят в активных системах. И некоторые общие достижения, общие подходы этой теории можно продуктивно применять в задачах управления научно-технологическим развитием, что и показывают вышеописанные примеры.

С другой стороны, представленные здесь примеры моделей организационно-технических и социально-экономических систем, в которых внедряются новые технологии, а также результатов моделирования внедрения новых технологий в рамках таких систем являются развитием ТАС как научной теории, вносят вклад в нее как конкретизация и приложения общей теории применительно к управлению НТР в активных системах.

## Литература

1. *Фролов Д.П.* Институциональная логика технологического прогресса // Journal of institutional studies (Журнал институциональных исследований). 2012. Т.4. № 1. – С. 49-64.
2. *Freeman C.* Unemployment and technical innovation: A study of long waves and economic development / Freeman C., Clark J., Soete L. – London: Frances Pinter, 1982. – 214 pp.
3. *Клочков В.В., Топоров Н.Б., Егошин С.Ф.* Интегрированные авиационные системы // Управление большими системами. 2021. Выпуск 90. – С. 94-120.
4. *Клочков В.В.* Экономика: учебное пособие для вузов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 684 с.
5. *Бейкер Л.* Эффект рикошета // В мире науки. 2007. № 9. – С. 6-7.
6. *Болбот Е.А., Клочков В.В.* Экономико-математический анализ предпосылок и последствий эффекта рикошета / Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 3. – С. 52-63.
7. *Селезнева И.Е.* Оптимальная стратегия государственного финансирования разработки высокотехнологичной продукции // Друкеровский вестник. 2018. № 6. – С. 37-50.
8. *Геворкян А.М.* Экономика и организация производства летательных аппаратов / Геворкян А.М., Минаев Э.С., Карасева А.А., и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 168 с.
9. *Бабенко И., Олейник В.* «Бельфегор» и битва за урожай // Авиация и время. 2006. № 2. – С. 4-17.
10. *Клочков В.В., Егошин С.Ф.* Организационно-экономический механизм внедрения технологий автоматизации управления воздушными судами в рамках авиатранспортных систем // Управление большими системами. Выпуск 111. М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 197-225.
11. *Рахманина В.Е., Касаткин А.А.* Экономические стимулы для внедрения технологий индивидуального мониторинга и прогнозирования состояния объектов авиационной техники // Сборник тезисов Международного аэрокосмического конгресса по аэронавтике. — М.: ЦАГИ, 2024. – С. 683-685.
12. *Варюхина Е.В., Клочков В.В.* Влияние ответственности персонала за возникновение предпосылок к летным происшествиям на безопасность полетов // Управление большими системами. 2013. Вып. 42. – С. 173-194.
13. *Клочков В.В., Крутов А.В., Рождественская С.М.* Институциональные проблемы управления изменениями в прикладной науке // Друкеровский вестник. 2019. № 3. – С. 120-133.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПРЕЦЕДЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Кулаков С.М., Киселёва Т.В., Койнов Р.С., Тараборина Е.Н.  
ФГБОУ ВО Сибирский государственный индустриальный университет,  
Новокузнецк, Россия  
rector@sibsiu.ru

*Аннотация. Представлен прецедентный подход к построению механизмов формирования управляющих решений в активных (организационных) системах. Разработан прецедентный цикл принятия регулярных решений. Сформирована функциональная структура системы прецедентного управления активным объектом. Указаны типовые задачи реализации прецедентного цикла. Представлены три практических механизма прецедентного управления применительно к промышленным и образовательным системам.*

*Ключевые слова: прецедент, прецедентный цикл принятия решений, механизм управления, функции и задачи системы прецедентного управления, программа ведения плавки стали. график организации работ в забое шахты. конструктор нормативных образовательных документов вуза.*

## Введение

Проблема автоматизированного управления слабо формализуемыми производственными объектами (СфПО), к которым относятся многие человеко-технические комплексы добывающих и перерабатывающих отраслей промышленности, а также другие активные объекты, сегодня не может быть признана эффективно решённой на базе классического математико-модельного подхода. Это обусловлено следующими факторами: изменчивостью характеристик внешних (природных) факторов; большим разнообразием состояний объектов; интенсивностью, сложностью и нестационарностью производственных процессов; многовариантностью работы используемых машин и агрегатов; многовариантностью продукции; присутствием управляющих и управляемых людей в системе управления. Перечисленные факторы и недостаточная эффективность современного автоматизированного управления побуждают развивать системы принятия управляющих решений для класса активных производственных и социальных объектов, в том числе в направлении создания систем автоматизированного (эргатического) управления, обладающих способностью к накоплению и использованию натуральных данных о практическом опыте выработки и реализации управляющих решений. В докладе рассматриваются вопросы конструирования и практического применения информационно-управляющих систем производственных или иных организаций, которые используют прецедентный метод принятия регулярных управляющих решений (*систем прецедентного управления, СПУ*). Указанный метод позволяет заменить трудно реализуемый и малоэффективный в условиях СфПО *модельный подход* к принятию управляющих решений *натурно-модельным* [1] и *натурным подходами*, первый из которых использует простые (корректирующие, пересчётные) факторные модели в сочетании с накопленными натуральными данными, а второй обходится только накопленными натуральными данными.

## 1. Классический цикл принятия решений как основа построения СПУ

Метод принятия решений на основе прецедентов широко известен и наглядно представляется так называемым CBR-циклом, [2,3,4]. Классический вариант CBR (Case-based reasoning) - цикла включает 4 основных этапа формирования решения для новой задачи (новой ситуации):

- извлечение (retrieve) из базы знаний одного или нескольких решений – прецедентов аналогичных задач (ситуаций);
- повторное использование (reuse) лучшего решения-прецедента;
- коррекция («адаптация», revise) отобранного прецедента с учетом особенностей новой задачи;
- сохранение (retention) нового прецедента в библиотеке прецедентов.

Выполненная авторами доклада конкретизация и модификация классического CBR-цикла применительно к принятию решений в эргатической системе управления СфПО состоит в учете ее особенностей, связанных с присутствием лица, принимающего решения (ЛПР), с разнообразием ситуаций в системе (внешних воздействий, состояний объектов управления, выходных воздействий, управляющих воздействий, целей управления, ограничений), с реализацией принятых решений и полученных результатов, с коррекцией (ретроспективной оптимизацией) реализованных, но недостаточно эффективных управляющих воздействий, с актуализацией базы данных о прецедентах (базы прецедентов). Результат такой конкретизации, в виде модифицированного цикла выработки и реализации управляющих решений показан на рисунке 1.

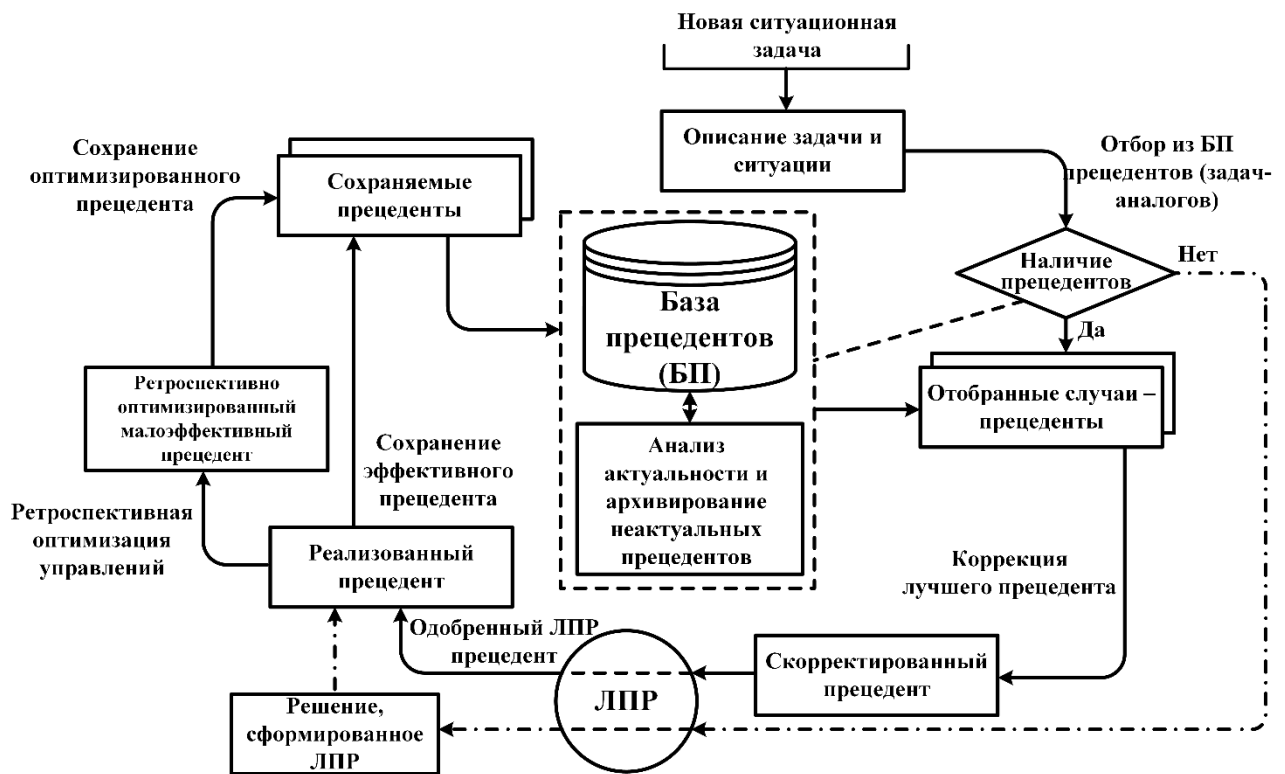


Рис. 1. Модифицированный цикл выработки и реализации управляющих решений в системе управления СфПО

## 2. Механизм системы прецедентного управления производственным объектом

Функциональная структура СПУ определяется механизмом формирования и реализации управляющих решений. Такая пошаговая процедура для управляющих решений в виде программы работы СфПО в предстоящем периоде работы включает следующие действия:

1) Определение данных, относящихся к условиям задачи формирования программы работы производственного объекта в предстоящем периоде времени  $[t, t+T]$ .

2) Поиск в базе прецедентов таких программ работы объекта, которые по исходным условиям и полученным результатам максимально близки к условиям и требуемым результатам задачи предстоящего периода. В качестве критериев оптимальности можно использовать метрики, рекомендованные в работе [5], дополнив их ограничениями на допустимые значения параметров полученного результата.

3) Коррекция управляющего решения оптимального прецедента, учитывающая существенные отличия исходных условий новой и прецедентной задачи формирования программы работы. При этом используется модель объекта управления «в малом», как это представлено в работе авторов [6]. В процедуре коррекции участвует ЛПР (например, оператор-технолог, мастер, заместитель начальника цеха).

4) Реализация результирующего управляющего решения осуществляется специальной подсистемой после одобрения его ЛПР.

Пополнение и актуализация базы прецедентов включает следующие операции:

- считывание данных, соответствующих реализованной программе работы производственного объекта;
- ретроспективная оптимизация фактически реализованной программы работ, если она имеет недостатки (непредусмотренные простои, ошибки персонала или средств автоматизации, снижение значений показателей эффективности), с использованием простых правил пересчёта в приращениях;
- сохранение фактического (если к нему нет замечаний) оптимизированного прецедента;
- - удаление из базы прецедентов тех экземпляров, которые со временем устаревают (в связи со значительными изменениями характеристик ПОУ, обновлением сортамента выпускаемой продукции и по другим причинам). Общая схема системы прецедентного управления СфПО, соответствующая вышеперечисленным действиям, представлена на рисунке 2.

Рисунок содержит следующие условные обозначения:  $\downarrow$  - датчики измерительной информации;  $\uparrow$  - исполнительные устройства;  $U^d, Y^d, W_H^d, W_K^d$  - векторы действительных (индекс «d») управляющих воздействий (решений), выходных воздействий, неконтролируемых (индекс «H») и контролируемых (индекс «K») внешних воздействий объекта управления;  $U^H, S^H, W_K^H, Y^H$  - векторы



натурных (индекс «**H**») сигналов измерительной информации об управляющих воздействиях, о состоянии объекта, о контролируемых внешних воздействиях, о выходных воздействиях технического объекта управления;  $\{PR^H\}$  - подмножество натурных (индекс «**H**») извлеченных прецедентов;  $PR^*$  - оптимальное прецедентное решение.

Структура СПУ включает следующие автоматизированные подсистемы: мониторинга, реализации текущего решения, отбора прецедентов, формирования и актуализации базы прецедентов. Мониторинг ориентирован на формирование и сохранение первичных данных о функционировании производственной системы, необходимых для создания информационной модели каждого прецедента. В нём особое внимание уделяется функциям контроля и управления достоверностью данных, в том числе за счёт автоматической проверки датчиков с уведомлением специалистов по эксплуатации средств контроля.

Реализация текущего решения (в форме принятой программы управления на текущий период работы СфПО) осуществляется при непосредственном участии ЛППР и средств автоматического управления. Отбор прецедентов выполняется в течение текущего периода работы СфПО, продолжительность которого определяется технологическим или календарным циклом работ производственного объекта. Пополнение базы прецедентов выполняется по окончании каждого цикла работы объекта и предполагает не только сохранение данных о высококачественных прецедентах, но и предварительную (перед сохранением) оптимизацию недостаточно эффективных прецедентов с применением, так называемых, пересчетных (корректировочных) математических [7], а также онтологических [8] моделей.

Актуализация базы прецедентов необходима в тех случаях, когда база быстро наполняется и часть её прецедентов устаревает, то есть становится очень редко востребованной в новых условиях. Эта часть усложняет и удлинняет процедуру поиска оптимальных прецедентов и должна быть перенесена из рабочей области базы прецедентов в архивную часть.

### **3. Примеры механизмов прецедентного управления в промышленности и образовании**

#### **3.1 Прецедентный механизм формирования программы ведения предстоящей плавки стали**

Программа управления предстоящей конвертерной плавкой стали представляет собой расписание работ (операций, действий), необходимых для осуществления процесса изготовления в кислородном конвертере заданной массы жидкого стального расплава, химический состав и температура которого позволяют в дальнейшем, в установке внепечной обработки стали (УВОС) и (или) агрегате «ковш-печь» (АКП), получить требуемую марку стали. В программе должны быть указаны: заданная марка стали, необходимое содержание C, S, P в расплаве и его температура, наименования работ (операций), используемые материалы и их количества, предписанная (нормативная) продолжительность и распределение работ во времени, ситуационные изменения (корректировки) фрагментов программы в процессе ее реализации.

Исходными данными для разработки программы являются: дата и номер предстоящей плавки, задание на марку стали и массу стального расплава, химсостав и температура жидкого чугуна, химсостав металлолома, заданный химсостав и температура расплава, требуемая основность шлака, параметры шлакообразующих, легирующих, углеродсодержащих, охлаждающих, раскисляющих твердых материалов, а также кислорода и азота.



Рис. 2. Механизм формирования управляющих решений на основе прецедентов.

Для решения задач, предусмотренных модифицированным СБР-циклом (рисунок 1), применительно к управлению производственным процессом выплавки стали, разработана информационная модель прецедента, под которым будем понимать выполненный комплекс работ (действий персонала сталеплавильного цеха), результатом выполнения которого являются основные и побочные продукты с требуемыми характеристиками. Информационная модель названного комплекса работ включает 3 раздела:

- информационную модель (базу данных) – 1, характеризующую ситуацию в системе управления производством работ, сложившуюся на момент принятия решения, т.е. построения программы подготовки и ведения работ для предстоящей плавки стали;
- информационную модель (базу данных) – 2, включающую данные о планируемых управляющих воздействиях, которые должны быть реализованы в процессе выполнения комплекса работ;
- информационную модель (базу данных) – 3, содержащую сведения о полученных результатах работ, т.е. данные о количестве и параметрах основной и побочной продукции, а также о достигнутых технико-экономических показателях.

В таблице 1 показан пример построения программы управления предстоящей плавкой стали на основе данных информационной модели выбранной плавки-прецедента.

Таблица 1. Пример определения параметров программы шихтовки и ведения плавки стали

п/п	Наименование параметра плавки стали	Номер плавки	Дата плавки	Номер конвертера	Заданная марка стали	Код способа разливки стали	Межплавочный простой [час:мин:сек]
1	Плавка-прецедент	...568	15.09.18	4	Ст3пс/э	0	0:09:59
2	Данные предстоящей плавки стали	...584	16.09.18	4	Ст3пс/э	0	0:26:56

п/п	Параметры жидкого чугуна						Параметры лома			
	Вес чугуна, т.	Температура, °С	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Вес лома, т.	Количество совков	Масса лома 1-го сорта, т.	Масса лома 2-го сорта, т.
1	255,1	1338	0,28	0,38	0,055	0,07	93	2	42,4	50,6
2	План	1377	0,45	0,41	0,02	0,069	Программа			
	Факт						Факт			
	255						93	2	42,4	50,6
	256,4						94,8	2	57	37

п/п	Длительность нагрева [час:мин:сек]	Расход O <sup>2</sup> на нагрев, м <sup>3</sup>	Расход угля, т.	Длительность продувки [час:мин:сек]	Длительность додувки [час:мин:сек]	Расход на продувку, м <sup>3</sup>	Расход известки, т.	Расход известняка, т.	Расход флоса, т.
1	00:06:51	2386	3,08	00:20:15*	00:00*	17265	11,52	0,53	4,07
2	Программа / Факт								
	10:37*	3702*	4,8*	20:15	00:00	17265	11,52	0,53	4,07
	06:17	2200	3,08	18:18	01:44	17443	14,11	0	4,11

п/п	Расход флоса ФМ, т	Данные на повалке						
		Основность шлака	Расход O <sup>2</sup> на плавку м <sup>3</sup>	Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание С, %	Содержание СаО, %	Содержание MgO, %	Содержание FeO, %
1	0,99	2,51	19651	1,79	0,039	26,4	11,3	43,1
2	Программа / Факт							
	0,99	2,51	19651	1,79	0,039	26,4	11,3	43,1
	0,99	2,3	19643	2,58	0,048	26	8,2	42,6

п/п	Данные на повалке
-----	-------------------

	Содержание P, %	Содержание Mn, %	Содержание MnO, %	Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Содержание S, %	Содержание SiO <sub>2</sub> , %	Содержание TiO <sub>2</sub> , %	Содержание V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	Температура, °С	Длительность плавки, [час:мин:сек]
1	0,006	0,064	4,62	1,08	0,043	10,5	0,56	0,86	1627	0:46:38
2	Программа / Факт									
	0,006	0,064	4,62	1,08	0,043	10,5	0,56	0,86	1627	49:24*
	0,004	0,045	4,68	0,99	0,034	11,3	0,9	1,12	1586	46:38

В строке 1 таблицы 1 представлены данные плавки-прецедента, которая по времени выполнения отстоит от предстоящей плавки менее чем на сутки и совпадает с ней по заданной марке стали. В строке 2 показаны фактические данные о химсоставе чугуна, длительности межплавочного простоя предстоящей плавки, а также планируемые (на базе прецедента) параметры. Для сравнения, в этой же строке, приведены фактические значения параметров шихтовки и ведения плавки технологами цеха, которые не имели возможности учитывать рекомендуемую программу управления данной плавкой. Вследствие последнего фактически реализованная программа ведения плавки имеет следующие недостатки:

- плавка №...584 проведена с додувкой продолжительностью 1 мин. 44 сек.;
- температура металла по окончании плавки (1536 °С) была существенно ниже нормы, которая должна быть не менее 1600 °С;
- основность шлака (2,3) была существенно ниже нормы, равной 2,5.

При формировании программы на основе плавки-прецедента некоторые параметры прецедента были скорректированы с учетом исключения додувки (длительностью 1 мин. 7 сек.) и компенсации значительного межплавочного простоя (продолжительностью 26 мин. 56 сек.). Измененные значения параметров отмечены в строках 1,2 звездочкой.

### 3.2. Механизм построения графиков работы сменных бригад очистного забоя угольной шахты

*График организации работ (ГОР)*, отображающий последовательность и длительность отдельных процессов и операций, при циклической организации производства в забое, принятом режиме выполнения работ и организации труда ориентирован на выполнение определённого числа рабочих циклов в сутки. Каждый цикл выемки угля в очистном забое есть совокупность периодически повторяющихся, в определённой последовательности, процессов и операций, которые обеспечивают продвижение забоя по всей длине на заранее установленный размер, при условии соблюдения правил техники безопасности [9,10].

ГОР состоит из *планограммы работ* и *эскиза положения забоя* на начало каждой смены, *графика выходов рабочих* по сменам, *таблицы технико-экономических показателей*, а также специальных символов, обозначающих основное оборудование и виды работ.

*Планограмма работ* есть символично-графическое и текстовое отображение пространственно-временных взаимосвязей технологических процессов и операций, выполняемых в забое в течение суток (смены). Она наглядно представляет все основные производственные процессы, выполняемые в забое, их последовательность и взаимную увязку в пространстве и времени. *График выходов* указывает число и состав рабочих по профессиям, необходимых для выполнения цикла выемки угля, их распределение по сменам и времени. В *таблице показателей* отображаются как горно-технические так и экономические показатели. К первым относятся: - мощность пласта, угол падения, длина лавы, вид механизации, тип выемочной машины и крепи. Ко вторым: - добыча с цикла, производительность труда бригады рабочих, себестоимость 1т угля по очистному забою.

Традиционно ГОР для каждого забоя составляет начальник участка и согласовывает его с горными мастерами, бригадирами и рабочими. В качестве исходных данных при этом используются: параметры угольного пласта, технические характеристики основного оборудования, численный состав бригад, нормативы выполнения отдельных работ и перерывов. Для повышения эффективности, при соблюдении правил безопасности, целесообразно составлять ГОР, особенно *планограммы работ*, ежедневно и корректировать их ежесменно. Последнее возможно осуществить посредством создания автоматизированной системы сменно-суточного планирования и мониторинга работы оборудования, а также сменных бригад. Подобная система может быть разработана на базе прецедентного подхода и метода принятия решений [11,12].

В качестве конкретного примера использования выше представленного прецедентного подхода рассмотрим задачу построения *планограммы работ* очистного комбайнового комплекса КМ138 (с комбайном РКУ 13) в течение смены. Планограмма выполняется сменным звеном, включающем 10-11 человек (машинист комбайна, 7 горнорабочих, 2-3 электрослесаря). Параметры угольного пласта: мощность 1,8 м, длина лавы -180 м. Ширина захвата угольного комбайна – 0,63 метра. Номинальная скорость хода комбайна – 5 м/мин. Нормативное время обслуживания (за один рабочий цикл) – 30 ми В каждом рабочем цикле звено выполняет следующие типовые операции: подготовительно-заключительные, зарубка комбайна, управление комбайном при выемке угля, вспомогательные операции, передвижка секций крепи, зачистка основания крепи, подготовка комбайна к перегону, управление комбайном при перегоне, ручная зачистка угля не погруженного комбайном, подготовка к передвижению конвейера, передвижка конвейера, сопряжение лавы с конвеерным штреком, сопряжение лавы с вентиляционным штреком.

В качестве планограммы – прецедента выбран график, показанный на рисунке 3, который характеризуется безаварийной работой в течение смены. Его временные характеристики показаны в 1-й строке таблицы 2.

В каждом рабочем цикле звено выполняет следующие типовые операции: подготовительно-заключительные, зарубка комбайна, управление комбайном при выемке угля, вспомогательные операции, передвижка секций крепи, зачистка основания крепи, подготовка комбайна к перегону, управление комбайном при перегоне, ручная зачистка угля не погруженного комбайном, подготовка к передвижению конвейера, передвижка конвейера, сопряжение лавы с конвеерным штреком, сопряжение лавы с вентиляционным штреком.

В качестве планограммы - прецедента выбран график, показанный на рисунке 3, который характеризуется безаварийной работой в течение смены. Его временные характеристики показаны в 1-й строке таблицы 2.

Таблица 2. Расчетные параметры циклов рабочей смены

№ п/п	Момент начала смены $t_0$	Время приема-передачи смены, мин.	Начало/окончание технологических циклов, мин				Скорость рабочего хода комбайна, м/мин.				Скорость перегона комбайна по циклам, м/мин.				Паузы между циклами, мин.			Программы
			$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$V_1^*$	$V_2^*$	$V_3^*$	$V_4^*$	$V_1^n$	$V_2^n$	$V_3^n$	$V_4^n$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	
1	0	38	$\frac{38}{125}$	$\frac{125}{210,5}$	$\frac{210,5}{297,5}$	$\frac{297,5}{384,5}$	5,4	5,0	5,0	5,0	5,4	5,0	5,0	5,0	7,5x4	7,5x4	6x3	$PR_j^{\hat{}}$
2	0	19,5	$\frac{19,5}{104,5}$	$\frac{104,5}{190,0}$	$\frac{190,0}{275}$	$\frac{275}{360}$	5,5	5,9	5,0	5,0	5,5	5,9	5,0	5,0	6,8x4	6,8x4	5,9x4	$PR_j^o$



Рис 3. Планограмма работы звена, выбранная в качестве прецедента

Недостатком прецедента является неполное завершение последнего (4-го) внутрисменного цикла работы на момент окончания смены. Потерянное время составило 24,5 мин. Оптимизация планограммы – прецедента может быть выполнена путем сокращения с 38 до 19,5 минут времени на прием – передачу смены и на 0,1 - 0,2 мин – времени пауз между циклами. Параметры оптимизированной планограммы приведены во второй строке таблицы 2

### 3.3 Механизм формирования нормативных документов университета с использованием метода прецедентов

Как известно, согласно требованиям ФГОС [13] учебные заведения обязаны ежегодно обновлять (актуализировать) внутренние нормативные документы образовательного процесса. Процесс разработки данных документов в разных учебных заведениях проходит по-разному: где-то с привлечением выделенных специалистов, но, в основном, ввиду огромного объема разрабатываемых документов, на основе распределения документов между преподавателями, ведущими дисциплины, а специалисты (например, методисты методического отдела) осуществляют контроль и окончательную доводку разработанных преподавателями документов [14-16].

Сам процесс разработки нормативных документов довольно трудоемок, поэтому предлагается применить модифицированный цикл выработки и реализации формирующих или корректирующих решений на основе документов-прецедентов и декомпозиции их содержательной части.

Для этого информационную модель прецедента  $\overline{Pr}$  можно представить следующими основными характеристиками: год начала подготовки  $Year$  (чем более свежий прецедент, тем его ценность выше), тип документа в привязке к его структуре  $T_{Struct}$ , наименование дисциплины  $D_{Name}$  (может быть неточным), онтологическое представление содержания прецедента  $\overline{C_{Ontology}}$ , (1), [17]. При этом онтологическое представление содержания прецедента подразумевает простую совокупность автоматически собранных ключевых слов (без учета склонений, с применением словаря) с указанием их весовых коэффициентов (количества повторов по тексту в расчете на общее количество ключевых слов в тексте, (2).

$$\overline{Pr} = \{Year, T_{Struct}, D_{Name}, \overline{C_{Ontology}}\} \quad (1)$$

$$\overline{C_{Ontology}} = \left\{ Keyword_1^{\left\{ \frac{r_1}{R}, \dots, \frac{r_i}{R} \right\}}, \dots, Keyword_i^{\left\{ \frac{r_1}{R}, \dots, \frac{r_i}{R} \right\}}, \dots \right\}. \quad (2)$$

где  $Keyword_1 \dots Keyword_i$  – ключевые слова, автоматически собранные из содержания прецедента (без учета склонений), которые включены в текст более одного раза;  $\frac{r_1}{R} \dots \frac{r_i}{R}$  – коэффициенты важности ключевых слов, рассчитанные как отношение количества повторов  $r$   $i$ -го ключевого слова на общее количество ключевых слов  $R$  в тексте содержания.

Таким образом, при формировании запроса на поиск подходящего прецедента ЛПР может задать один или несколько из представленных характеристик (год начала обучения, тип документа, название дисциплины, перечень ключевых слов). Поиск, по ключевым словам, осуществляется таким образом, что приоритетными становятся те прецеденты, для которых сумма коэффициентов важности указанных ключевых слов наибольшая.

На основе механизмов прецедентного подхода к процессу формирования нормативных документов учебной деятельности в СибГИУ разработана автоматизированная система конструирования нормативных документов (АС «Конструктор документов ООП»). Последняя является частью комплекса систем, используемых в СибГИУ для реализации учебного процесса: ИС «Деканат» (приобретенный продукт); программный комплекс «ПЛАНЫ ВПО+СПО» (приобретенный продукт); база данных документов ООП (собственная разработка СибГИУ, которая является хранилищем утвержденных документов по направлениям подготовки, специальностей, дисциплин и т.д.); электронный каталог научно-технической библиотеки СибГИУ «МегаПро» (приобретенный продукт); подключаемые внешние электронные библиотечные системы (в т.ч.: «Консультант студента», «Лань», «Университетская библиотека онлайн», «Юрайт»).

Процесс разработки документов ООП включает следующие этапы:

2.1 Создание в программном комплексе «ПЛАНЫ ВПО+СПО» учебных планов по направлениям подготовки / специальностям. В СибГИУ этим занимаются либо учёные секретари кафедр, либо учебный отдел.

2.2 Загрузка данных о планах в ИС «Деканат» (БД MS SQL Server).

2.3 Создание в системе ООП (БД документов ООП) первоначального набора объектов, подлежащих разработке (рабочие программы, фонды оценочных средств и т.д.). За объектами закрепляются разрабатывающие их преподаватели.

2.4 Агрегирование в АС «Конструктор документов ООП» вышеперечисленных данных, необходимых для успешной разработки документов и предоставление преподавателю веб-интерфейса с перечнем закрепленных за ним объектов. Преподаватель наполняет объекты оригинальным содержимым, которое невозможно сформировать автоматически (например, сущностным содержанием лекций, практических занятий и т.д.). На этом этапе может быть применен прецедентный подход для заполнения содержания на основе имеющегося прецедента.

2.5 Формирование преподавателем MS Word-файла, который загружается в систему электронного согласования для проверки и утверждения документа всеми подписантами.

2.6 Сохранение файла в формат pdf в случае его «кругового» одобрения, подписание электронной цифровой подписью (ЭЦП) и загрузка в хранилище документов ООП.

2.7 Конкретизация процесса автоматизированной разработки документа в АС «Конструктор документов ООП».

Показана эффективность предложенной методики, заключающаяся в сокращении затрат времени на разработку, стандартизации оформления, ускорении согласования документов ООП. Предварительный анализ показал, что эффективность предложенного метода тем выше, чем больше накопленной информации о прецедентах имеется в БД прецедентов.

#### 4. Заключение

Изложена концепция создания и применения механизмов прецедентного управления в активных (человеко-технических, социальных, экономических) системах, включающая: реальную (действующую) активную (организационную) систему, описание модифицированного цикла процесса принятия управляющих решений в действующей системе на основе решений-прецедентов, укрупнённую структуру системы прецедентного управления, информационную модель прецедентов и соответствующую базу данных, содержащую информацию о прошлых ситуациях в системе, принятых (реализованных) управлениях и полученных результатах. Рассмотрены три конкретных механизма прецедентного управления, а именно: механизм формирования программы ведения предстоящей плавки стали в кислородном конвертере, механизм построения планов работы сменных бригад очистного забоя угольной шахты, механизм разработки преподавателями кафедр вуза учебных планов по конкретным направлениям подготовки специалистов а также соответствующих рабочих программ дисциплин, фондов оценочных средств и других нормативных документов. Показана возможность существенного повышения эффективности принимаемых ЛПП прецедентных управляющих решений.

#### Литература

1. Мышляев Л.П. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография: в 3 т. - Т. 2: Системы автоматизации производственного назначения / под ред. Л. П. Мышляева. – Наука, 2006. – 483 с.
2. Kolodner J. Case-based reasoning. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers. – 1993. – 386 p.
3. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. AI Communications. IOS Press, Vol. 7: 1, pp. 39-59.
4. Варшавский П.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // РАН, Искусственный интеллект и принятие решений, №2, 2009, ISSN: 2071-8594. – С. 45-57.
5. Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. № 2. Изд. 3, стереотип. URSS. 2018. - 272 с.
6. С. М. Кулаков, В. Б. Трофимов, А. С. Добрынин, Е. Н. Тараборина Прецедентный подход к формированию программ управления объектами циклического действия. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2017 : труды XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 14-16 декабря 2017 г. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2017. – С. 11-19.
7. Мышляев Л.П. Развитие пересчётного моделирования для систем управления / Л.П. Мышляев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1989. - №12. – С. 129 – 132.
8. Авдеенко Т. В. Система поддержки принятия решений в IT-подразделениях на основе интеграции прецедентного подхода и онтологии / Т. В. Авдеенко, Е. С. Макарова // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ. – 2017, № 3, 85–99.
9. Васюченко Ю.Ф. Горное дело. Учебник. М.: Недра, 1990.-512 с.
10. Милехин Г.Г. Процессы очистных работ. Методические указания по выполнению самостоятельных работ и курсового проектирования для студентов заочного обучения специальности 130404.-Подземная разработка месторождений полезных ископаемых /Г.Г. Милехин, А.Н. Любин. г. Мурманск: изд-во Апатитского филиала МурГТУ, 2006 г.
11. Карпов Л.Е. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов ./Л.Е. Карпов, В.Н. Юдин //Труды института системного программирования РАН, т.13,ч.2.-М., 2007,-с. 37-57.
12. Варшавский П.П. Методы правдоподобных рассуждений на основе аналогий и прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений / П.П. Варшавский, А.П. Еремеев // Искусственный интеллект и принятие решений. 2006. №3.-с.39-62.
13. Федеральные государственные образовательные стандарты [Электронный ресурс] // Портал Федеральных государственных образовательных стандартов. - М. URL: <http://fgosvo.ru/fgosvo/151/150/24>
14. Космачёва И.М., Квятковская И.Ю., Сибикина И.В. Автоматизированная система формирования рабочих программ учебных дисциплин // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-formirovaniya-rabochih-programm-uchebnyh-distsiplin>.
15. Кряжев С.А., Левковский Д.И. Информационная система поддержки рабочей программы дисциплины // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-sistema-podderzhki-rabochey-programmy-distsipliny>.

16. *Ботыгин И. А.* Автоматизированная система удаленного формирования документов фонда оценочных средств профессиональных образовательных программ / *И. А. Ботыгин, В. Н. Попов* // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. — 2006. — Т. 309, № 7. — [С. 221-225]. — URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/1424>.
17. *Сидорова Е.А.* Подход к моделированию процесса извлечения информации из текста на основе онтологии // Онтология проектирования. 2018. №1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-modelirovaniyu-protssessa-izvlecheniya-informatsii-iz-teksta-na-osnove-ontologii>.



# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЩАТЕЛЬНОГО РЕСУРСА В ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОТИВОБОРСТВЕ

**Петров А.П.,**

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

petrov.alexander.p@yandex.ru

**Подлипская О.Г.**

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),*

*Долгопрудный, Россия*

podlipskaya.og@phystech.edu

*Аннотация. При информационном противоборстве каждая из сторон обладает, как правило, ограниченным ресурсом на вещание. Соответственно, в различных контекстах возникает задача распределения этого ресурса с целью достижения максимального количества сторонников. Доклад суммирует результаты ряда проведенных исследований.*

*Ключевые слова: информационное противоборство, математическое моделирование, управление, игра Блотто*

## **Введение**

Информационное сообщение, идея, тезис - то, что в литературе часто называют обобщенным понятием "мем" [1] - распространяется в населении, вообще говоря, как средствами массовой информации, так и самими членами этого населения, которые пересказывают мем друг другу в устной форме либо, например, через интернет.

При этом вещательный ресурс является, как правило, ограниченным. Удобный образ состоит в том, что сторона противоборства, например, предвыборный штаб политической партии, имеет возможность закупать рекламное время на телевидении. Ограничения могут иметь, вообще говоря, различный характер. Во-первых, ограниченной может быть интенсивность вещания: именно, количество времени, выделяемое для пропагандистского вещания в один день, не может превышать некоторую заданную величину. С другой стороны, может быть ограниченным общий объем вещания на протяжении кампании.

Другая постановка вопроса предполагает, что информационное противостояние происходит по двум темам, например, экономика и внешняя политика. В этом случае ресурс распределяется между темами: партия может опубликовать большое количество материалов про экономику и малое – про внешнюю политику, либо наоборот.

Во всех случаях стоит задача распределения ресурса таким образом, чтобы максимизировать целевую функцию, либо имеющую смысл количества сторонников на некоторый момент времени, либо учитывающую как количество сторонников, так и затраты на вещание.

Настоящий доклад суммирует результаты работ [2-4] в данном направлении.

Именно, рассматриваются три задачи распределения ресурса. Раздел 1 посвящен задаче оптимального управления в нейрологической модели информационного противоборства. В предположении, что противная сторона вещает с постоянной интенсивностью, ставится задача максимизации целевого функционала, учитывающего как количество сторонников, так и затраты на вещание. Применяется принцип максимума Понтрягина; показано, что, в зависимости от параметров, оптимальная стратегия может быть как возрастающей, так и убывающей.

Здесь под (нестрого) возрастающей мы понимаем стратегию, при которой кампания начинается с вещания низкой интенсивности, и постепенно усиливается с течением времени. При (нестрого) убывающей кампании интенсивность является максимальной в начале кампании и убывает с течением времени. Стратегия с постоянно интенсивностью вещания называется плоской.

Раздел 2 рассматривает серию теоретико-игровых ситуаций, в которых каждая из сторон имеет выбор между линейно возрастающей, линейно убывающей и плоской стратегиями. Тем самым, возникает матричная игра. Показано, в частности, что при неравенстве ресурсов победу в информационном противоборстве может одержать партия, имеющая меньший ресурс, но выбирающая более эффективную стратегию.

В разделе 3 рассматривается модель противоборства по двум темам. Каждая из сторон обладает ограниченным вещательным ресурсом и распределяет его между этими темами. Тем самым, в модели возникает игра Блотто.

Все модели настоящего доклада являются макромоделями: они не учитывают сетевую структуру общества. Модели с сетевой структурой рассматриваются, например, в работах [5-7], а также и более эмпирически ориентированных публикациях [8, 9].

## 1. Управление в нейрологической модели информационного противоборства

Нейрологическая модель информационного противоборства [10] описывает борьбулевой и Правой партий и имеет вид

$$\frac{d\psi}{dt} = c \left( 2 \int_{-\psi}^{\infty} n(\varphi) d\varphi - N \right) + u - b - a\psi. \quad (1)$$

Здесь  $N$  – численность населения, параметры  $a, b, c$  положительны, причем  $b$  имеет смысл интенсивности вещания мема в поддержкулевой партии. Переменная  $u$  является управлением и имеет смысл интенсивности вещания мема в поддержку Правой партии. Она имеет ограничение

$$0 \leq u \leq u_m. \quad (2)$$

Переменная  $\psi(t)$  и неотрицательная функция  $n(\varphi)$  позволяют определить численности сторонников партий как

$$L(t) = \int_{-\infty}^{-\psi(t)} n(\varphi) d\varphi, \quad R(t) = \int_{-\psi(t)}^{\infty} n(\varphi) d\varphi. \quad (3)$$

Здесь величина  $\varphi$  называется установкой и отражает предрасположенность того или иного индивида к поддержке той или иной партии, а функция  $n(\varphi)$  – распределение индивидов по установке. Например, если  $n(\varphi)$  равна нулю при  $\varphi \leq 0$ , то никто из населения не предрасположен к поддержкелевой партии.

Целевой функционал имеет вид

$$J = -\frac{k}{2} \int_0^T u^2 dt + R(T), \quad (4)$$

что соответствует задаче максимизации численности сторонников Правой партии на момент окончания противоборства (например, дня выборов)  $T$  при минимизации затрат на вещание.

Для задачи (1)-(4) в работе [2] рассмотрен случай равномерного симметричного распределения установок:  $n(\varphi) = \text{const} > 0$  при  $|\varphi| \leq \varphi_m$ , где  $\varphi_m > 0$ . Применен принцип максимума Понтрягина; аналитически показано, что если параметр

$$\lambda = a - cN/\varphi_m \quad (5)$$

положителен, то оптимальное управление соответствует возрастающей стратегии. Если же параметр  $\lambda$  отрицателен, то оптимальное управление соответствует убывающей стратегии.

Содержательная трактовка данного результата учитывает смысл параметров  $a, c$ . Первый из них описывает скорость, с которой индивиды теряют интерес к мемам, второй описывает интенсивность передачи мемов от индивида к индивиду. Если отношение  $a/c$  достаточно велико, т.е.  $\lambda > 0$ , то имеет место ситуация, в которой индивиды мало распространяют мем и быстро теряют к нему интерес. В этом случае оптимальная стратегия является возрастающей так, чтобы большинство индивидов получило мем непосредственно перед днем выборов и не успело потерять интерес к нему. Если же отношение  $a/c$  достаточно мало, т.е.  $\lambda < 0$ , то имеет место ситуация, в которой индивиды активно распространяют мем друг другу и не теряют интерес к нему. В этом случае оптимальная стратегия является убывающей: интенсивность вещания должна быть максимальной в самом начале, чтобы запустить процесс изустного распространения.

## 2. Противоборство с выбором стратегий обеими партиями

В предыдущем разделе рассматривалась модель, в которой одна из сторон выбирала оптимальную стратегию при условии, что противная сторона имела плоскую стратегию вещания. В настоящем разделе рассматривается теоретико-игровая ситуация: каждая из сторон располагает определенным ресурсом и распределяет его во времени, имея выбор между линейно возрастающей, линейно убывающей и плоской стратегиями.

При этом, для описания процесс противоборства в данном выберем модель Михайлова [11]. Одно из ее отличий от нейрологической модели состоит в том, что она описывает процесс информационного противоборства как распределение беспартийных индивидов по партиям. Именно, члены населения, которые в начале процесса были нейтральными, с течением времени примыкают к партиям – каждый индивид примыкает к той партии, чей мем получит первым. Переубеждение, т.е. переход из одной партии в другую в этой модели невозможен. Другими словами, численность сторонников каждой из партий является возрастающей функцией времени.

В противоположность этому, динамика нейрологической модели – это, главным образом, динамика переубеждения. Так, изложенный в предыдущем разделе вариант нейрологической модели вообще не предполагает нейтральность: каждый индивид является сторонником той или иной партии, а численности сторонников меняются со временем так, что если одна партия увеличилась, то другая на столько же уменьшилась.

Динамика численностей  $x(t), y(t)$  сторонников партий описывается в модели Михайлова системой уравнений

$$\frac{dx}{dt} = (\alpha_x(t) + \beta_x x)(N - x - y) - \gamma x, \quad x(0) = x^0. \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = (\alpha_y(t) + \beta_y y)(N - x - y) - \gamma y, \quad y(0) = y^0. \quad (7)$$

Здесь  $\alpha_x, \alpha_y$  – интенсивности распространения мемов через вещание, а  $\beta_x, \beta_y$  – через коммуникацию индивидов. Таким образом, если  $T$  – продолжительность противостояния, то, например,

$$\int_0^T \alpha_x(t) dt$$

представляет собой интегральный ресурс вещания Партии X. Цель партии X состоит в максимизации разности  $x(T) - y(T)$  при том, что для обеих партий заданы величины доступных интегральных ресурсов, и каждая из них распределяет этот ресурс во времени с ограничением вида  $|\alpha_x(t)| \leq M$ .

В работе [3] рассматривалась упрощенная постановка задачи. Именно, каждая партия имела три опции распределения своего интегрального ресурса: линейно возрастающая, линейно убывающая и плоская стратегии. Исследование проводилось с помощью численных экспериментов: фикс каждая из трех стратегий партии X комбинировалась с каждой из трех стратегий партии Y. Для каждого из девяти случаев проводился расчет уравнений модели и вычислялась разность численностей партий  $x(T) - y(T)$  на момент окончания противостояния. Тем самым, формировалась платежная матрица, на основании которой для каждой партии определялась наилучшая (из трех доступных) стратегия.

### 3. Игра Блотто в модели с двухкомпонентной повесткой дня

Нейрологическая модель информационного противостояния позволяет также моделировать противостояния, проводящиеся по более чем одной тематике. Например, предвыборная кампания может концентрироваться вокруг таких двух тем, как экономика и миграция, причем, например, Левая партия является в глазах избирателей более привлекательной по экономической теме, а Правая – по миграционной.

В таком случае борьба идет не только за то, чтобы убедить избирателей встать на позицию партии, но также за повестку дня, то есть, за то, какой из двух вопросов сочтет приоритетным большинство избирателей. Теория информационной повестки известна довольно давно [12]. Математические модели, учитывающие эту теорию, предложены в работах [13, 14].

При наличии двух тем, каждая из противостоящих сторон встает перед задачей распределения своего ресурса между этими темами. В терминах приведенного примера каждая партия тратит одну часть своего ресурса на распространение своей позиции по экономической теме, а другую часть – по теме миграции. Например, если улевой партии имеется 5 единиц ресурса и рассматриваются только целочисленные стратегии, то она имеет стратегии 0+5 (0 единиц направляется на агитацию по экономике, и 5 – на тему миграции), 1+4, 2+3, 3+2, 4+1, 5+0 – всего есть стратегий. Аналогично, если в распоряжении Правой партии имеется, например, 4 единицы ресурса, то она имеет 5 возможных стратегий. Для каждой пары стратегий (стратегиялевой партии против стратегии Правой партии) решаются уравнения математической модели, учитывающей теорию информационной повестки дня, и определяется разность численностейлевой и Правой партий на конец противостояния.

Тем самым, имеет место игра Блотто. Именно, каждая из партий имеет набор стратегий в плане распределения ресурсов по двум темам. Элементы платежной матрицы для каждой пары стратегий – это указанная разность численностей сторонников. Решение игры Блотто определяет стратегии оптимального распределения ресурсов для каждой из партий.

### 4. Заключение

Если исследование информационного противостояния нацелено на поиск оптимального распределения ресурса одной из сторон при условии, что стратегия другой стороны известна, то естественным образом возникает задача управления. Если же целью является одновременный поиск оптимальных распределений ресурса для обеих сторон, то возникает теоретико-игровая ситуация. В настоящей работе представлен обзор нескольких возникающих при этом моделей.

Одно из основных ограничений данного подхода состоит в том, что он не использует лингвистические инструменты [15-17] и тем самым, не учитывает содержательную сторону мемов.

## Литература

1. *Weng L., Flammini, A., Vespignani, A., Menczer, F.* Competition among memes in a world with limited attention // Scientific reports. – 2012. – V. 2. – №. 1. – Article 335.
2. *Петров А.П.* Оптимальное управление в нейробиологических моделях информационного противоборства // Computational mathematics and information technologies. — 2023. — N 2. С. 40-51. DOI: 10.23947/2587-8999-2023-7-2-40-51.
3. *Mikhailov A., Petrov A., Pronchev G., Proncheva O.* Increasing, Decreasing and Flat Strategies in Information Warfare // Proceedings of the 22nd Conference on Scientific Services & Internet (SSI-2020). Novorossiysk-Abrau (online), Russia, September 21-25, 2020. pp. 201-210. CEUR-WS.org, online. <http://ceur-ws.org/Vol-2784/rpaper16.pdf>
4. *Podlipskaia O.G.* Blotto Game in a Propaganda Battle // Computational Mathematics and Information Technologies. - 2022. N 3. – P. 114-120.
5. *Жеглов С.А.* Поиск паттернов в динамике протестных кампаний: вычислительное моделирование и эмпирический анализ // Социология: методология, методы, математическое моделирование. — 2022. — № 54–55. — С. 129–187.
6. *Chkharishvili A.G., Gubanov D.A.* On the concept of an informational community in a social network // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1864, No. 1. — P. 012052.
7. *Chkharishvili A.G., Gubanov D.A., Novikov D.A.* Social networks: models of information influence, control and confrontation. — Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019.
8. *Kozitsin I.V.* A general framework to link theory and empirics in opinion formation models // Scientific reports. — 2022a. — Vol. 12. — P. 5543.
9. *Kozitsin I.V.* Formal models of opinion formation and their application to real data: evidence from online social networks // The Journal of Mathematical Sociology. — 2022b. — Vol. 46, No. 2. — P. 120–147
10. *Петров А.П., Маслов А.И., Цаплин Н.А.* Моделирование выбора позиций индивидами при информационном противоборстве в социуме. Математическое моделирование. 2015;27(12):137–148. <http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=mm&paperid=3684>.
11. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. - М.: Наука, Физматлит, 1997, - 320 с.
12. *McCombs M., Shaw D.* The agenda-setting function of mass media // Public opinion quarterly. – 1972. – Vol. 36. – №. 2. – P. 176-187.
13. *Petrov A., Proncheva O.* Propaganda battle with two-component agenda // Proceedings of the MACSPro Workshop. – 2019. – P. 21-23.
14. *Proncheva O.* A model of propaganda battle with individuals' opinions on topics saliency //2020 13th International Conference " Management of large-scale system development"(MLSD). – IEEE, 2020. – P. 1-4.
15. *Akhtyamova L., Alexandrov M., Cardiff J., Koshulko O.* Opinion mining on small and noisy samples of health-related texts // Advances in Intelligent Systems and Computing III (Proc. of CSIT-2018). — Springer, AISC, 2018. — Vol. 871. — P. 1–12.
16. *Boldyreva A., Sobolevskiy O., Alexandrov M., Danilova V.* Creating collections of descriptors of events and processes based on Internet queries // Proc. of 14th Mexican Intern. Conf. on Artif. Intell. (MICAI-2016). — Springer Cham. LNAI, 2016. — Vol. 10061. — P. 303–314.
17. *Pronchev G.B., Goncharova I.V., Lyubimov A.P., Mikhailov A.P.* Information Security and Online Education During the COVID-19 Pandemic //Journal of Higher Education Theory and Practice. – 2023. – Vol. 23. – №. 2. – P. 218-232.

# ТОЧНЫЕ ОЦЕНКИ ЧИСЛА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПОСТАНОВКЕ М.И. РУБИНШТЕЙНА

**Пономарев Ю.Ю.**

ООО «Автоматизированные системы, консалтинг, информационные технологии»,  
Москва, Россия  
yura\_graph@mail.ru

*Аннотация.* В классической работе М.И. Рубинштейна «Задачи синтеза иерархических систем управления» была поставлена задача синтеза иерархических систем управления в общем виде, относящаяся к классу задач дискретного программирования. В настоящей работе даются точные оценки количества решений этой задачи, а также приводится алгоритм комбинаторного построения решений.

*Ключевые слова:* синтез иерархических систем управления, теория графов, дискретное программирование, кодирование деревьев, комбинаторная теория.

## Введение

Приведем постановку задачи из [1]. Пусть управляемая структура состоит из  $N$  объектов. Для каждой пары объектов заданы величины связи  $a(i, j), i, j = 1, \dots, N, a(i, j) > 0$  – если объекты связаны,  $a(i, j) = 0$  – если связи между объектами нет.

Приведем описание некоторой фиксированной иерархической структуры управления из  $M$  уровней, в котором каждый уровень имеет  $m_i$  элементов,  $i = 1, \dots, M$ .

Таблица 1- Уровни иерархии в иерархической структуре управления

Номер уровня	Число элементов
$m_M = 1$	□
...	
...	
...	
$m_3$	□ □ □ □ □ ... □ □ □ □
$m_2$	□ □ □ □ □ ... □ □ □ □
$m_1 = N$	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span>□ □ □ □ □ ... □ □ □ □</span> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 5px;"> <span style="font-size: 1.2em;">}</span>  <math>N</math>  <span>объектов</span> </div>

Первый уровень состоит из  $N$  объектов управляемой системы.

Обозначим через  $t$  вектор размерности  $M$  с компонентами  $m_i$ . Пусть  $k$ -й элемент  $l$ -го уровня иерархии ( $k = 1, \dots, m_l; l = 2, 3, \dots, M$ ) «управляет» элементами  $(l-1)$ -го уровня, составляющих множество  $R_k^{l-1}$ .

Множества  $R_k^{l-1}$  можно описать булевыми векторами  $r_k^{l-1}$  размерности  $m_l$ :  $i$ -я компонента  $r_k^{l-1}$  равна 1, если  $i$ -й элемент  $(l-1)$ -го уровня входит в  $R_k^{l-1}$  и равна 0 в противном случае. Векторы  $r_k^{l-1}$  можно свести в один вектор  $r^{l-1}$  размерности  $m_{l-1}m_l$ , а векторы  $r^{l-1}$ , ( $l = 2, 3, \dots, M-1$ ), в свою очередь, свести в вектор

$r$  размерности  $\sum_{l=2}^{M-1} (m_{l-1} m_l)$ . Описанную иерархическую структуру управления будем обозначать через  $S(M, m, r)$  или просто  $S$ .

## 1 Определение эффективности структуры

Перейдем к определению эффективности структуры  $S$ . Обозначим через  $S_0$  все возможные структуры.

Эффективность разбиения элементов первого уровня структуры  $S$  на множества  $R_k^1 (k = 1, 2, \dots, m_2)$  будем характеризовать величиной  $\Phi_1(S)$  по правилу:

$$\Phi_1(S) = \frac{1}{m_2} \sum_{k=1}^{m_2} \frac{1}{|R_k^1|(|R_k^1| - 1)} \sum_{p \in R_k^1} \sum_{t \in R_k^1} a(p, t), \quad (1)$$

где  $|R|$  – число элементов в  $R$ .

$\Phi_1(S)$  дает среднее по множествам  $R_k^1$  значение величины связи между элементами, попавшими в одни и те же множества  $R_k^1$ .

Эффективность каждого  $l$  – го уровня структуры  $S$  определяется по формуле, обобщающей (1):

$$\Phi_l(S) = \frac{1}{m_{l+1}} \sum_{k=1}^{m_{l+1}} \frac{1}{|R_k^l|(|R_k^l| - 1)} \sum_{p \in R_k^l} \sum_{t \in R_k^l} a^l(p, t). \quad (2)$$

Эффективность  $\Phi(S)$  всей структуры  $S$  может быть определена следующим способом:

$$\Phi(S) = \frac{1}{M-1} \sum_{l=1}^{M-2} \Phi_l(S). \quad (3)$$

## 2 О задаче синтеза оптимальной структуры

Как указано в [1], задачи синтеза иерархических систем управления относятся к сложному классу задач дискретного программирования. В терминах [1] задача синтеза оптимальной структуры имеет следующий вид:

$$\max_{S \in S_0} \{\Phi(S)\}. \quad (4)$$

При этом на  $S(M, m, r)$  накладываются ограничения следующего вида:

$$M_1 \leq M \leq M_2, \quad (5)$$

$$m_l^1 \leq m_l \leq m_l^2, \quad (6)$$

$$n_l^1 \leq |R_k^l| \leq n_l^2, \quad (7)$$

где  $k=1, 2, \dots, m_l, l=1, 2, \dots, M-1, (M_1, M_2, m_l^1, m_l^2, n_l^1, n_l^2)$  – заданные целые числа.

Фактически, задачу можно записать через булеву матрицу иерархии объектов.

Таблица 2 – Булева матрица иерархии объектов в иерархической структуре управления

Номер уровня	Число элементов
$m_M = 1$	1
...	
...	
...	
$m_3$	1                      1
$m_2$	1                      1                      1
$m_1 = N$	0 0 0                      0 0 0                      0 0 0

Преимуществом использования булевой матрицы является возможность кодирования любого состояния системы. Недостатком булевой матрицы является то, что задачу (4) с логическими векторами

можно решать только перебором всех  $2^{\sum_{l=2}^{M-1} m_{l-1} m_l}$  векторов.

### 3 Оценка сложности задач целочисленного программирования

В современной литературе для сложности задач целочисленного программирования приводятся различные оценки.

Из работ первопроходцев надо отметить работу Х. Ленстры [2].

Авторы многих других работ не приводят свои оценки того, насколько они приближаются к решению NP-полной задачи, которой, в общем случае, является задача целочисленного программирования.

Приведем полную оценку сложности, указанную в [3]:

$O(2^n nm + 8^n n \sqrt{m \log m \log m} + n^{2.5n+o(n)} s \log m)$ , где  $n$  - число переменных,  $m$  - число ограничений и  $s$  - максимальное число бит, требующихся для записи числа ограничений или оптимизируемой функции.

Предлагается поменять формализм «булевой матрицы» или решения задачи (0-1) программирования на более изученный объект – DOWN-UP код. Более точно, предлагается иерархическую древовидную структуру записать в виде DOWN-UP кода.

### 4 Понятие о DOWN-UP коде

**Определение.** DOWN-UP код - это последовательность вида:  $A = \{a_i, i \in (2n + 1), a_i, n \in N, a_i \in (2n), n \in N, a_i \in N \cup 0\}$ , при этом элементы, имеющие четные индексы строго меньше обеих соседствующих с ними элементов с нечетными индексами,  $|A|$  - число элементов в коде или размерность кода, число всегда нечетное,  $|A| \geq 3$ .

Формально правило преобразования в DOWN-UP код записывается следующим образом: на уровне  $m_1$  объекты обозначаются «0», на  $m_2$  объекты обозначаются «1», но соединим их «0» как символом ветвления, на уровне  $m_3$ , полученные на предыдущем уровне элементы соединяются «0» и так далее до уровня  $m_M$ .

Фактически каждая «управляющая» вершина, которая «управляет» вершинами нижнего уровня, заменяется на DOWN-UP код, включающий в себя элементы нижних уровней.

Отсюда следует утверждение 1.

**Утверждение 1.** На уровне  $M$  количество нулей в DOWN-UP коде, соответствующем множеству  $R_k^{l-1}$ , на 1 меньше, чем число вершин, которыми на уровне  $M-1$  «управляет» данная вершина.

В Таблице 3 Утверждение 1 показано схематически.

Таблица 3 - Схематически для  $M=3$  и  $N=\{1,2,3,4,5,6\}$  запишем DOWN-UP код

$m_3$	21212021212	
$m_2$	10101	10101
$m_1$	000	000
Номер объекта	1 2 3	4 5 6

На основании утверждения на уровне  $m_3$  могут появиться DOWN-UP коды следующего вида:  $\{20212121212\}, \{21202121212\}, \{21212021212\}, \{21212120212\}, \{21212121202\}$ . На уровне  $m_2$  будут появляться множества из двух кодов  $\{\{1\}, \{101010101\}\}, \{\{101\}, \{1010101\}\}, \{\{10101\}, \{10101\}\}, \{\{1010101\}, \{101\}\}, \{\{101010101\}, \{1\}\}$ . На уровне  $m_1$  появляться множества из  $\{0\}$ . Поставив напротив  $\{0\}$  номер вершины получим биекцию между  $N=\{1,2,3,4,5,6\}$  и элементами DOWN-UP кода.

Пользуясь введенным в статье [4] формальным определением кодирования корневых деревьев DOWN-UP кодом, можно заменить все возможные множества  $R_k^{l-1}$  на DOWN-UP код и получить ряд результатов о минимальной точной оценке числа решений задачи (4).

Далее в докладе излагается метод нахождения решений системы уравнений, задающих DOWN-UP код, и находятся сами решения. Предполагается, что перед решением уравнений исследователь проверит

системы уравнений на возможность перечисления решений, что выходит за рамки данной работы. Анализ представления DOWN-UP кода для каждого корневого дерева основывается на результатах из [5,6].

## 5 Решение задачи оптимизации структуры методом DOWN-UP кодирования

Пусть суммарное число множеств всех уровней иерархии  $R_k^{l-1}$  есть  $Z$ . Тогда уравнение, описывающее DOWN-UP код будет иметь вид [5]:

$$Z = \sum_{i=1, i-\text{нечет.}} q_i - \sum_{i=2, i-\text{чет.}} s_i + 1, i \leq \#|R_1^M|, \quad (8)$$

где  $\#|R_1^M|$  - размерность DOWN-UP (число элементов) кода на уровне  $M$ . Элементы DOWN-UP кода имеют вид  $\{q_i, i \in (2n+1), q_i, n \in N, s_i \in (2n), n \in N, s_i \in N \cup 0\}$ . Обозначим число решений уравнения через  $Z_{M,N}$ , где  $N$  - число объектов на 1-м уровне. Под средней высотой  $h(S)$  будем понимать среднюю высоту графа иерархической структуры управления  $S$ , то есть суммарную высоту всех вершин над корнем, поделенную на число вершин.

Ограничения (5)-(7) переформулируем на решения уравнения (8) и сформулируем ряд утверждений, в которых  $k=1,2,\dots,m_l, l=1,2,\dots,M-1, (M_1, M_2, m_l^1, m_l^2, n_l^1, n_l^2)$  - заданные целые числа.

**Утверждение 2.** Ограничения (5) при решении уравнения (8) переходят в условие:

$$M_1 - 1 \leq q_i \leq M_2 - 1, i = 1, i - \text{нечетные}, i \leq \#|R_1^M|, \quad (9)$$

Доказательство Утверждения 2. На основании процедуры построения DOWN-UP кода, максимальные элементы кода из уравнения (8) изменяются от уровня  $m_1$  до уровня  $M$ . Следовательно, на последнем уровне они на 1 меньше, чем заданное число уровней.

**Утверждение 3.** Ограничения (6) при решении уравнения (8) переходят в условие: не существует такого решения (8), при котором при вычитании из кода любого  $m_l - 1$  размерность  $d$  получаемых кодов не удовлетворяла бы условию:

$$m_l^1 \leq 2d - 1 \leq m_l^2 \quad (10)$$

Доказательство Утверждения 3. По построению кода, вычитание из кода номера уровня  $m_l - 1$  приводит код в состояние, когда на заданном уровне иерархии вершина управляет объектами предыдущего уровня. Переходя на рассмотрение размерности получаемых кодов, получаем требуемое условие.

**Утверждение 4.** Ограничения (7) переходят в ограничения числа кодов  $W_l$  на каждом уровне  $l$  иерархической системы:



$$n_i^1 \leq W_l \leq n_i^2, \quad (11)$$

Доказательство Утверждения 4.

По построению кода, на каждом уровне  $l$  иерархической системы будет порождаться ряд кодов, соответствующих числу управляющих вершин. Для заданного уровня  $l$  достаточно отнять его номер минус 1 и посчитать число получающихся кодов.

Для дальнейшего моделирования были написаны программы на C++. Результаты получены численно на основании множества решенных задач. Общий вид формул был найден в [4].

**Утверждение 5.** При условии, что все  $N$  объектов на  $l$ -м уровне управляются всеми объектами на последующих уровнях  $i = 2, \dots, M$ , значение  $Z_{M,N}$  не превосходит  $\frac{C_{2Z-2}^{Z-1} - Z}{Z}$ .

Доказательство Утверждения 5. В работе [4] и ее литературных источниках был указан общий вид формулы, доказанной независимо несколькими группами ученых. Численные эксперименты позволили несколько улучшить ее точность.

**Утверждение 6.** Суммарное число связей, характеризующих все возможные решения задачи (4) есть  $4^{Z-2}$ .

Доказательство Утверждения 6. В классической работе Фрэнка Харари «Теория графов» приведено простое доказательство данного утверждения.

**Утверждение 7.** Сложность задачи синтеза иерархической структуры максимальна при  $\lceil (2N - 3) / 2 \rceil$ .

Доказательство Утверждения 7. Получена численная аппроксимация оценки сложности иерархической системы с различными  $M$  и  $N$ . Так как общая формула для максимального числа решений уравнения (8) при  $N$  около 10 дает около 5000 решений, то на текущий момент для больших  $N$  проводятся дополнительные исследования с выводом асимптотической формулы.

**Утверждение 8.** Существует единая оценка сложности средней высоты  $h(S)$  решения задачи синтеза иерархической структуры при любой заданной  $S$ .

Доказательство Утверждения 8. В работе [4] есть доказательство данного факта. Для его проверки была сделана численная аппроксимация.

**Утверждение 9.** Сложность задачи синтеза иерархической структуры (4) является  $NP$ -полной, однако оценка ее сложности не превосходит полинома степени  $N$  с целыми коэффициентами при выполнении условий Утверждений 1-3.

Доказательство Утверждения 9. Доказательство первой части утверждения есть в [2]. Для уточнения результата была сделана численная аппроксимация, попытка доказательства другим способом есть в работе [5].

**Утверждение 10.** Сложность синтеза иерархической структуры можно свести к задаче полиномиальной сложности, если фиксировать число объектов  $N$ , число уровней иерархии  $M$ .

Доказательство Утверждения 10. Была сделана попытка численной аппроксимации результатов для малых  $N$  и  $M$ .

**Утверждение 11.** Существует эффективная для каждого уровня иерархии конечная процедура обчета выражения (3), если элементы DOWN-UP кода принимать за элементы множеств  $R_k^{l-1}$ .

Доказательство Утверждения 11. В условиях Утверждений 9-10 DOWN-UP кодирование дает эффективные методы подсчета сумм вида (2) и (3), может использоваться для доступа к величинам связи  $a(i, j), i, j = 1, \dots, N$ .

Некоторые численные результаты приведены в Таблице 4.

Таблица 4- Результаты вычислений согласно [5,6].

Z	$4^{Z-2}$	Минимальная точная оценка числа решений задачи (4)
3	4	1
4	16	4
5	64	13
6	256	41
7	1024	131
8	4096	428
9	16384	1429
10	65536	4861

## Заключение

В данном докладе приводятся точные оценки числа решений задачи синтеза иерархических систем управления для условий целочисленности, налагаемых на ее параметры. Доказанные утверждения позволяют построить точную оценку числа решений, проверить параметры на непротиворечивость, решить задачу (4). В дальнейшем могут быть получены результаты, вводящие понятие синтеза изоморфной иерархической системы, уточняющие и обобщающие ряд теорем из монографии [7]. В работе [6] приводится ряд результатов, касающихся анализа иерархических систем на основании их метаданных.

## Литература

1. *Рубинштейн М.И.* Задачи синтеза иерархических систем управления // Согласованное управление. Сборник статей. М.: ИПУ РАН, 1975. — С. 78-84.
2. *H.W. Lenstra.* Integer programming with a fixed number of variables // Mathematics of operations research. — 1983. — Ноябрь (т. 8, вып. 8).
3. *Eisenbrand, F.* Fast Integer Programming in Fixed Dimension. In: Di Battista, G., Zwick, U. (eds) Algorithms - ESA 2003. ESA 2003. Lecture Notes in Computer Science, vol 2832. Springer, Berlin, Heidelberg.
4. *Волошин Ю.М.* Перечисление термов предметных областей по глубине вложенности // Докл. АН СССР 1974. Т. 219. № 6.— С. 1294–1297.
5. *Пономарев Ю. Ю.* Вопросы точных оценок характеристик деревьев при моделировании термов предметных областей, нейросетей, XML данных // Процессы управления и устойчивость. 2023. Т. 10. № 1.— С. 309–317.
6. *Пономарев Ю. Ю.* Вопросы точных оценок характеристик деревьев при моделировании метаданных в информационных системах общего назначения // Процессы управления и устойчивость. 2024. Т. 11. № 1.— С. 253-261.
7. *Воронин А.А., Мишин С.П.* Оптимальные иерархические структуры. М.: ИПУ РАН, 2003. — 214 с.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ВНУТРИФИРМЕННОГО ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

**Россихина Л.В.**

*Академия управления МВД России, Москва, Россия*

rossihina\_lv@mail.ru

**Резников Д.А.**

*Воронежский институт ФСИИ России, Воронеж, Россия*

i@dareznikov.ru

*Аннотация. В статье приведена математическая формализация задачи внутрифирменного обучения персонала с учетом приоритетных для них направлений. Разработан алгоритм решения, основанный на известных алгоритмах решения транспортной задачи. Приведен пример, демонстрирующий реализацию предложенного алгоритма.*

*Ключевые слова: транспортная задача, двудольный граф, направление подготовки, оценка, показатель важности.*

## Введение

За последние полвека произошла смена нескольких концепций мира. В конце прошлого века на смену устойчивому, предсказуемому, простому, определенному SPOD-миру пришел изменчивый, неопределенный, сложный, неоднозначный VUCA-мир, который был переформатирован в период пандемии COVID-19 в BANI-мир – сложную, хаотичную, не имеющую ясной структуры реальность, для которой характерна высокая степень тревожности, связанная с ожиданием масштабной катастрофы.

В последние годы получила широкое распространение концепция SHIVA-мира – мира жестокой реальности, уничтожающей все прежнее (методы, модели, подходы и прочее), повергающей в ужас, мешающий противостоять вызовам, принимать оперативные решения, порождающий неуверенность, что эти решения приведут к позитивным изменениям, но дающей надежду на зарождение новой реальности после достижения миром финальной стадии падения.

В современных условиях SHIVA-мира активно руководителями организаций в управлении применяется стресс-менеджмент, предполагающий развитие персонала, его обучение по программам повышения квалификации и переподготовки, включая внутрифирменное обучение [1].

Согласно [2], под внутрифирменным обучением персонала следует понимать инициированный организацией процесс обучения работников с целью совершенствования их знаний и компетентности, навыков и умений для увеличения их вклада в достижение максимальной эффективности деятельности организации.

В отечественных компаниях основными моделями внутрифирменного обучения являются системная модель и модель формирования компетенций [3].

Системная модель определяет организацию как целостную систему и предполагает групповое обучение.

Модель формирования компетенций предполагает развитие способности персонала с определенным набором компетенций адаптироваться к различным условиям деятельности.

Рассматривая процесс внутрифирменного обучения персонала можно выделить основные этапы [4]:

- определение потребностей в обучении персонала;
- постановка целей обучения;
- определение критериев эффективности;
- определение содержания программы обучения, форм и методов;
- организация учебного процесса;
- оценка результатов обучения.

## 1. Постановка задачи

Имеется  $n$  работников, которые должны пройти внутрифирменное обучение. Число направлений подготовки равно  $m$ . Пусть  $b_{ij}$  – оценка компетентности  $i$ -го претендента на обучение по  $j$ -му направлению,  $q$  – максимальная величина оценки,  $a_{ij} = q - b_{ij}$  – отставание от максимальной оценки  $i$ -го претендента по  $j$ -му направлению,  $n_j$  – число обучающихся по  $j$ -му направлению. Необходимо осуществить оптимальное распределение работников организации по направлениям подготовки с учетом приоритета направления для конкретной должности штатного расписания и оценки их компетентности по направлению подготовки.

### 1.1. Математическая формулировка задачи

Определить  $\{x_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , где  $n = \sum_j n_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , максимизирующие

$$A(x) = \sum_{i,j} \lambda_j a_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_j x_{ij} = 1, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ij} = n_j, j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где  $\lambda_j$  – важность  $j$ -го направления,  $x_{ij}$  – переменная, которая принимает значение равное 1, если  $i$ -й претендент на обучение назначен на  $j$ -е направление, в противном случае 0.

Примем  $c_{ij} = \lambda_j a_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ .

Задача (1)-(3) является классической транспортной задачей [5].

## 2. Алгоритм решения

На рисунке 1 приведен граф транспортной задачи (двудольный граф).

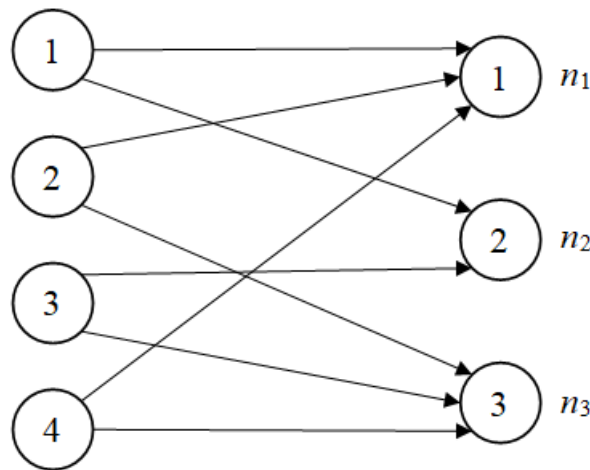


Рис.1. Двудольный граф транспортной задачи

Предварительный шаг. Назначаем каждого претендента  $i$  на направление  $j$  с максимальным  $c_{ij}$ .

Основной шаг. Определяем для каждой вершины  $j$  число претендентов  $u_j$ , назначенных на соответствующее направление. Вершины, для которых  $u_j > n_j$ , назовем входами, а вершины, для которых  $u_j < n_j$  – выходами. Длины дуг  $(i, j)$  положим равными  $c_{ij}$ , а длины дуг  $(j, i)$  примем равными  $(-c_{ij})$ . Определяем путь максимальной длины от входов к выходам. Вдоль этого пути  $x_{ij} = 1$ , а  $x_{ji} = 0$ .

Далее повторяем основной шаг.

Алгоритм заканчивается, когда  $u_j = n_j$  для всех  $j$ .

## 3. Пример решения задачи

Имеется четыре претендента на обучение и три направления. Оценки компетентности работников организации по направлениям представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценки компетентности работников по направлениям

Сотрудник	Направление		
	1	2	3
1	2	3	
2	4		2
3		3	2
4	4		3

Двудольный граф приведен на рис.2.

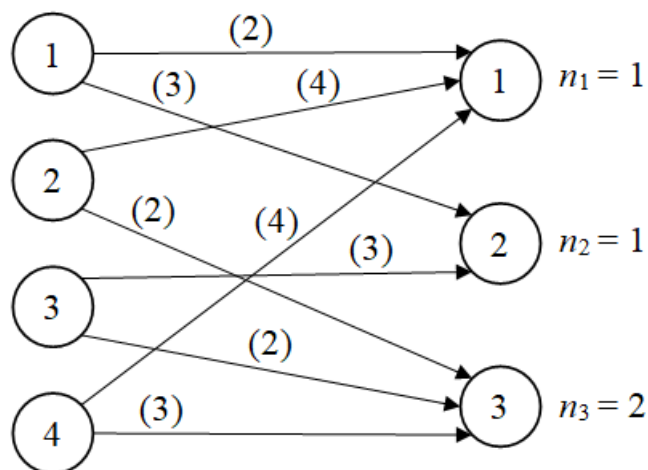


Рис.2. Двудольный граф для примера

Предварительный шаг. Имеем:  $x_{12} = 1, x_{21} = 1, x_{32} = 1, x_{41} = 1$ .

Шаг 1. Вычисляем:  $u_1 = 2 > n_1, u_2 = 2 > n_2, u_3 = 0 < n_3$ . Таким образом направления 1 и 2 – входы, а направление 3 – выход. Путь максимальной длины (1, 4, 3) имеет длину (-1). Переназначаем претендента 4 с направления 1 на направление 3.

Шаг 2. Теперь  $x_{43} = 1, u_1 = 1 = n_1, u_2 = 2 > n_2, u_3 = 1 < n_3$ . Имеем: направление 2 – вход, а направление 3 – выход. Путь максимальной длины (2, 3, 3), его длина (-1). Переназначаем претендента 3 с направления 2 на направление 3.

Окончательное решение:  $x_{12} = 1, x_{21} = 1, x_{33} = 1, x_{43} = 1$ . Суммарное отставание равно 12.

#### 4. Заключение

Рассмотренная задача распределение работников организации по направлениям подготовки с учетом приоритета направления для конкретной должности штатного расписания и оценки их компетентности, является частным случаем транспортной задачи, относящейся к задачам о назначении.

В статье приведена новая постановка задачи, предложен алгоритм решения, основанный на известных алгоритмах решения задач о назначении.

#### Литература

1. Кузнецов Е., Сабирова З. Управление стрессом персонала в современных условиях SHIVA-мира // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2003. N 5. – С. 111–115.
2. Ананченкова П.И. Современные модели внутрифирменного обучения // Вестник Московского гуманитарно-экономического института. 2023. N 5. – С. 265–276.
3. Павлов Я.Ю., Евсеева И.К., Казакова И.Л. Менеджмент корпоративного обучения и принятие решения об обучении // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. 2021. Т. 18. N 2(116). – С. 124 – 133.
4. Тонконог В.В., Ананченкова П.И. Влияние корпоративных программ обучения и развития сотрудников на эффективность компании // Вестник Башкирского института социальных технологий. 2022. N 4(57). – С. 42 – 49.
5. Бурков В.Н. Теория графов в управлении организационными системами / В.Н. Бурков, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков. – М.: СИНТЕГ, 2001. – 124 с.

# АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА

Столбов В.Ю., Онискив В.Д., Макаров В.Ф., Песин М.В., Щелудяков А.М.  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
valeriy.stolbov@gmail.com, oniskivf@gmail.com

*Аннотация. Рассматривается задача адаптивного управления станками с ЧПУ с учетом износа инструмента. Приводится постановка задачи управления производительностью станка с ограничениями на шероховатость обработанной поверхности. Считается, что при износе инструмента повышается шероховатость. Поэтому с увеличением износа требуется снижать величину подачи режущего инструмента. Для оценки износа инструмента используется зависимость износа от величины сигнала, характеризующего вибрацию инструмента, измеряемую с помощью специального датчика. Зависимости шероховатости поверхности от величины виброускорения и режимов резания определяются с помощью технологии нейросетевого моделирования и машинного обучения.*

*Ключевые слова: станки с ЧПУ, адаптивное управление, шероховатость поверхности, износ инструмента, величина вибрации, нейросетевое моделирование*

## Введение

Адаптивное управление станками является новым этапом развития металлообрабатывающего оборудования [1]. При обработке заготовок на станках с ЧПУ уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания процесса обработки и насколько изменяются исходные параметры, принятые при расчете и составлении управляющей программы (припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.).

В действительности условия процесса обработки изменяются во времени случайным образом по следующим причинам:

- непрерывно изменяются режущие свойства инструментов, которые невозможно точно определить в данный момент;
- неопределенные свойства всей технологической системы (упругие и температурные деформации, вибрации);
- для каждой заготовки из обрабатываемой партии имеется разброс припусков, твердости, структуры металла и др.

Поэтому качество обработки зависит от опыта оператора станка ЧПУ и влияние «человеческого фактора» здесь велико [2]. Адаптивное управление станками, в отличие от обычных систем ЧПУ, обеспечивает автоматическое приспособление процесса обработки заготовки к изменяющимся условиям обработки по определенным критериям. Это приспособление осуществляется на основе информации, получаемой системой управления непосредственно в процессе обработки заготовок.

На основе получаемой информации о текущем состоянии процесса обработки система адаптивного управления станка, увеличивая или уменьшая объем снимаемого металла с заготовки путем соответствующего изменения скорости резания и подачи, поддерживает постоянным предельное значение какого-либо заданного параметра обработки (например, силы резания) или в более общем, но и более сложном случае — обеспечивает получение оптимальных значений точности, производительности или себестоимости обработки заготовок.

В рассматриваемом случае предлагается использовать подход оптимального адаптивного управления. Целью проекта является повышение производительности резания при обеспечении заданного уровня шероховатости обрабатываемой поверхности.

Общая схема оптимального адаптивного управления приведена на рис. 1. Адаптивные системы оптимального управления при обработке заготовок осуществляют автоматический поиск и поддержание таких сочетаний скорости резания  $V$  и подачи  $S$ , которые обеспечивают экстремальное значение целевой функции  $J(V,S)$  обработки (точность, производительность или себестоимость обработки) при наличии технических ограничений и действии возмущающих воздействий (колебаний припуска, твердости материала заготовки, изменения режущих свойств инструмента и др.)



Рис. 1. Схема построения адаптивной системы оптимального управления [1]

Основой для построения системы **адаптивного управления станками** оптимального типа является математическая модель управляемого процесса обработки, задающая аналитически систему технических ограничений области поиска оптимальных режимов резания и выражающая зависимость критерия оптимальности от параметров процесса обработки.

## 1. Постановка задачи адаптивного управления

В качестве критерия оптимальности  $J$ , характеризующего производительность процесса, выберем объем металла, снимаемого за период резания:

$$J(x(t), z(t)) = O(x, z) / T, \quad (1)$$

где  $x(t)$  – вектор-функция управления процессом резания;  $z(t)$  – функция износа инструмента;  $O$  – объем снимаемого металла;  $T$  – рассматриваемый период времени.

Требуется найти такие оптимальные управления  $x^*$ , при которых критерий оптимальности достигает максимума

$$J(x^*, z(t)) = \max J(x(t), z(t)) \quad (2)$$

при ограничениях типа равенств:

$$h(t) = F(x(t), z(t)), \quad t \in [0, T] \quad (3)$$

$$z(t) = G(p(t)), \quad t \in [0, T] \quad (4)$$

и неравенств

$$h(t) < h^*, \quad t \in [0, T]. \quad (5)$$

Здесь  $h(t)$  – функция, характеризующая уровень шероховатости обработанной поверхности;  $p(t)$  – вектор-функция, характеризующая работу станка ЧПУ в процессе резания (уровень вибрации, сила резания, температура и т.д.),  $h^*$  – заданное значение допустимого уровня шероховатости.

Отметим, что в задаче управления (1)-(5) функции  $F$  и  $G$  выступают в качестве модели процесса резания. Предлагается их определять с помощью нейросетевого моделирования, т.е. их можно считать нейросетевыми аппроксиматорами, построенными на основе экспериментальных данных, полученных на конкретном станке ЧПУ при обработке конкретного материала с помощью фиксированного инструмента [3].

## 2. Алгоритм решения

Для решения поставленной задачи адаптивного управления (1)-(5) предложен следующий алгоритм:

1. Выбираются параметры управления процессом резания: величина подачи  $S$ , мм/об; глубина резания  $l$ , мм; скорость резания  $V$ , м/мин.
2. Назначаются пределы изменения параметров:  $S_{min}=0,1$  мм/об;  $S_{max}=0,5$  мм/об;  $l=fix$ ;  $V=fix$  (глубина и скорость резания считаются постоянными и задаются из возможностей оборудования).
3. Выбирается шаг управления:  $\Delta S=0,1$  мм/об.
4. Резание начинается с максимального значения подачи  $S_{max}$ .
5. Непрерывно вычисляется энергия сигнала с датчика, характеризующая уровень вибрации и износа инструмента, по формуле:

$$\hat{E}^* = \sum_{i=1}^N \frac{\ddot{A}_i^2(v_i)}{v_i^2}, \quad (6)$$

где  $A_i$  – амплитуды Фурье-спектра виброускорения на заданном интервале времени обработки,  $N=4$ ,  $v_i$ -частоты (берутся первые 4 частоты, соответствующие наибольшим значениям амплитуды).

6. По величине энергии с помощью обученной нейросети определяется шероховатость поверхности [3] при заданных режимах резания.

7. При достижении максимально допустимой величины шероховатости снижается величина подачи и процесс обработки продолжается дальше.

Следует отметить, что данный алгоритм обеспечивает выполнения условия (2) поставленной задачи оптимального управления, так как процесс обработки начинается с максимально возможной величины подачи инструмента, постепенно снижая ее при выходе на ограничение (5).

### 3. Заключение

Предложен эффективный алгоритм адаптивного управления процессом резания на станке с ЧПУ в рамках оптимального подхода. Отличительной особенностью алгоритма является использование нейросетевых аппроксиматоров, задающих зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины энергии сигнала с датчика (6), характеризующей уровень вибрации и износа инструмента при различных режимах резания. Предложенный алгоритм обеспечивает максимально возможный объем съемного металла при заданной шероховатости поверхности, что значительно повышает производительность процесса токарной обработки.

### Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках федеральной программы «Приоритет-2030».

### Литература

1. Балакишин Б. С. Адаптивное управление станками. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 256 с.
3. Данелян В.С., Клюев А.В., Макаров В.Ф. Нейросетевой аппроксиматор зависимости шероховатости поверхности от режимов резания /Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024668654, 09.08.2024. Заявка от 09.08.2024.



# ИНТЕГРАЦИЯ АКТИВНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЯМИ И ИНЖЕНЕРНЫМИ ДАННЫМИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ

Трибелев А.А.

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия

tribelev88@icloud.com

*Аннотация. В настоящее время реализация технически сложных объектов требует больше ресурсов и гибкости при управлении в условиях консервативных сроков и ресурсов, что требует поиска дополнительных средств по оптимизации самого управления. В статье рассматривается возможное применение активных сетевых структур для оптимизации управления конфигурациями и инженерными данными на примере реализации технически сложных объектов капитального строительства.*

*Ключевые слова: активные сетевые структуры, управление конфигурациями, управление инженерными данными.*

## Введение

При реализации современных подходов реализации проектов строительства объектов капитального строительства задача по управлению инженерными данными становится все более сложной. Жизненный цикл объектов капитального строительства определен в [1]. При этом важно понимать специфику каждого этапа для выстраивания работы с инженерными данными. Первые этапы, связанные с проектными обоснованием являются более гибкими по отношению к реализации изменений и механизмы входного контроля поступающих данных как новых, так и валидированных на более поздних этапах. Этап производства является наиболее динамичным, менее гибким и именно он является поставщиком наибольшего числа изменений, предполагаемых к реализации. Этапы эксплуатации являются наиболее стабильными с точки зрения операции с данными и на них мы располагаем наибольшим количеством времени для приведения инженерных данных в соответствие. Этап утилизации не производит обновленных данных как таковых, однако консервация самого объекта капитального строительства осуществляется именно на основании консистентности консолидированных данных за время всего сопровождения объекта. Для реализации подобного класса строительных объектов требует привлечение большого числа строительных организаций, проектных организаций, поставщиков различных материалов, эксплуатирующих и демонтирующих организаций. При этом проектные сроки остаются консервативными. Контроль реализации технически сложных объектов капитального строительства требует консолидации большого числа процессов и результатов их деятельности. В условиях цифровизации это требует реализации интеграции большого числа информационных систем и средств автоматизации в единую ИТ-архитектуру, которая должна включать, как контур заказчика, так и контур подрядчика. В таких условиях вырастает риск ошибки. Данные риски могут выражаться как в неточности данных, поставляемых в управляющий контур, так и в задержках производственных процессов. И то, и то влечет за собой потери временные и финансовые на митигацию подобных рисков. Как правило технически сложные объекты капитального строительства сопряжены с реализацией опасных техногенных объектов. Примером такого может служить АЭС, сооружения космической инфраструктуры, ГХК, НХК и т.п. [1]. То есть понижение качества для таких объектов просто не допустимо. В условиях конкуренции и строгих требований по качеству и срокам реализации данных проектов поиск эффективных решений для оптимизации управления реализацией становится критически важным.

В сложившихся условиях особые требования выдвигаются к управлению инженерными данными для отслеживания качества выполнения работ. При этом, за качество соответствия отвечает реализация такой дисциплины как управления конфигурациями объектов капитального строительства. Как показано на примере [2] методологический инструментарий при этом может быть достаточно обширным и реализован довольно гибко. В условиях цифрового подхода это означает снижение зависимости от традиционных методов интерпретации и интеграции данных и заменой его на альтернативные методы. То есть в настоящее время вполне реальными и экономическими оправданными зачастую считают методы с применением загрузочных файлов или применение живого оператора в условиях передачи данных между двумя изолированными контурами (например, заказчика и контрагента, работающих в своих корпоративных сетях). Зачастую при этом, искусственно создаются специальные туннели для реализации таковых, например, с выделением отдельных учетных записей в смежных информационных системах. Альтернативой данному методу может служить применение активных сетевых структур в составе общей ИТ-архитектуры, способных за счет собственной интеграции в производственные процессы улучшить управление инженерными данными и реализацию подхода по управлению конфигурациями, обеспечивая надежную поставку данных для всех стейкхолдеров.

В данной статье рассмотрены основные тенденции и подходы к интеграции активных сетевых структур в ИТ-ландшафт предприятия для реализации проектов технически сложных объектов капитального строительства.

## **1. Обзор литературы**

### **1.1. Управление конфигурациями при реализации технически сложных объектов капитального строительства**

Методология контроля качества реализации технически сложных объектов капитального строительства определена на различных уровнях прежде всего законодательно. Рассмотрим подобную реализацию на примере АЭС. Данный случай является постоянно совершенствующейся адаптацией общей методологии СМ2Р [3]. Первоначально связь между контролем качества реализации объектов использования атомной энергии и составом таковых устанавливается на уровне технического документа МАГАТЭ [4]. Далее идет конкретизация данного свода правил до прикладных дисциплин, которые должны быть реализованы непосредственно в производственных процессах предприятия. Примером на этом уровне может служить международный стандарт ISO [5] для реализации зарубежных атомных станций или же ГОСТ [6] для реализации атомных станций на территории Российской Федерации. При этом в стандартах приводится в явном виде связь между базовыми конфигурациями контролируемых АЭС и формируемыми информационными моделями объектов капитального строительства. Поддержка данного вида производственной деятельности регламентирована аналогично серией стандарта ISO [7] и ГОСТ [8]. Консистентность данных и своевременная поставка их в общую конфигурационную структуру регламентирована серией прикладных стандартов, например [9].

Описанный выше сквозной процесс аналогичным образом описывается уже на прикладном уровне конкретного предприятия через серию стандартом предприятий и руководств пользователей, позволяющая обеспечивать аналогичный сквозной процесс непосредственно в потоке создания ценности предприятия.

### **1.2. Управление инженерными данными при реализации технически сложных объектов капитального строительства**

Выше был определен сквозной процесс, реализация которого обеспечит подачу данных в информационную модель контролируемого объекта капитального строительства. При этом стоит учитывать тот факт, что в процесс создания данных для информационной модели вовлечены не один поставщик таковых. Создание элементов конфигурации при этом может происходить как в координирующей деятельности инжиниринговой компании, так и непосредственно у контрагентов. Данные элементов конфигурации оцифровываются перед консолидацией в единой цифровой модели. При этом средства цифровизации могут быть совершенно изолированы в собственных ИТ-архитектурах отдельных предприятий. Как правило собственный инструментарий предприятий ориентирован на ту стадию жизненного цикла, с которой чаще всего приходится работать. То есть, если это проектный институт, то скорее всего большая часть процессов здесь будет собрана на базе САПР-систем, если же это поставщик товарно-материальных ценностей на строительную площадку, то скорее всего большая часть процессов здесь будет собрана на базе регламентно-учетных систем. Итоговая информационная модель должна в себя собирать данные с различных этапов жизненного цикла. В организации подобного постоянного процесса может помочь реализация на практике постановлений [10]. Важность данного реализации данного инструмента отмечается и в уже выбранной атомной отрасли [11], и космической отрасли [12], химической отрасли [13] и строительной отрасли в целом [14].

### **1.3 Применение активных сетевых структур при реализации объектов капитального строительства**

Как было сказано ранее, каждый этап жизненного цикла, определенно на примере [1], обладает собственной спецификой. Рассмотрим более подробно примеры существующих подходов на каждой этапе с учетом особенностей.

Этап проектного обоснования является наиболее устоявшимся в области цифровой реализации. Важным является осуществление входного контроля поставляемых данных, как новых, так и валидированных на более поздних этапах жизненного цикла. В явном виде данная рабочая область не предполагает применение физической реализации активных сетевых структур. Однако, существует проблематика обработки поступающих данных, в том числе в условиях множества потребителей на стороне акцептора, а так же множества источников данных на стороне донора. Подразумевается, что данная задача решается на уровне кибернетических методов, заменяя фактическое понимание активных сетевых структур. В качестве примеров активных сетевых структур и их возможного использования в области технически сложных объектов возьмем практику [15]. Данный пример является консервативным. В ней существует поток данных направленных от периферийных источников к мастер-хранилищу. При этом идет процессы верификации и валидации поступающих данных, а так же идет работа с выявляемыми

гэпами. В представленной в [15] схеме организации производственного процесса активными элементами как с точки зрения формирования данных, так и с точки зрения организационной структуры выступает BIM-менеджер. С точки зрения [16] данная роль консервативно обладает всеми признаками активной сетевой структуры, внутри производственного процесса. Безусловно, это не равно определению активной сетевой структуры, сохраняя все признаки таковой.

Этап производства и строительства является наиболее динамичным. Здесь важно обеспечить интегрированный подход в части реализации концепции управления BIM и поддержку сетевых структур. Рассмотрим типовой состав производственных работ на этапе производства конструкций на примере [17] и определим степень их связанности и механизм поставки данных

Существующие концепции предполагают пока одностороннюю поддержку данной интеграции. Например, концепция [18] предполагает замещение активными механизмами частично ручного труда в части выполнения работ, что приводит к профиту в части связанности данных при реализации перехода между проектированием и производством конструкций. Координация в пространстве производимых работ, например, при проведении геодезического контроля, может быть рассмотрена на основе концепции [19]. Данная концепция реализуется на основе совмещения позиционирования с применением подвижных активных систем. Дополнительно, данная концепция может быть усилена за счет применения концепции [20], которая предполагает контроль производимых работ за счет реализации активных-сетевых структур, свободно перемещаемым согласно рабочим операционным маршрутам перемещаемым внутри общей рабочей зоны. Связка таких концепций может

Этап эксплуатации должен обладать достаточными свойствами для сбора данных и сведения их в общий «цифровой двойник». Здесь важно обеспечение методичности сбора данных, в том числе связи производимых операционных работ, операционных изменений и мониторинга состояния управляемого объекта капитального строительства.

Сбор данных может быть осуществлен на примере концепции [21]. В данном примере интеграция является так же является односторонней. Мы осуществляем поставку данных в условиях привязке к локальному месту производства данных и дальнейшая обработка таковых осуществляется внутри ИТ контура компании. Дополнительно данный метод обработки можно усилить за счет концепции [22], которая предполагает использование независимых систем для выполнений тех или иных операций, в том числе по устранению неисправностей, что в комбинации даст приемлемый уровень консистентности обрабатываемых данных. Отслеживание состояния в данном случае ведется на уровне операционной деятельности систем. Поставка обрабатываемой информации осуществляется итерационно.

На этапе демонтажа существует концепция [23], которая позволяет в автономном режиме выполнять операции, при этом в привязке к геолокации, получая отчеты о проделанной работе от сигнала систем, мы можем так же итерационно получать валидированные данные о данных, переводимых из статуса, фиксирующих фактическое состояние проекта, в статус, демонтировано.

## **2. Подходы к интеграции**

В условиях цифрового подхода процессы компании автоматизируются с применением информационных систем. При поддержке сооружения объектов капитального строительства комплексно должны решаться обе задачи и по управлению конфигурацией самого производимого объекта, и по реализации программы по поддержке таковой с применением активных сетевых структур. К задачам, которые должны быть поставлены перед комплексным подходом можно определить следующее:

Первая техническая проблема. В контексте создания технически сложного объекта капитального строительства их совокупность должна обеспечивать и поддержку методологического сквозного процесса, определенного в 1.1 и включать в себя технологии, обеспечивающие консистентность и достаточность данных, определенные в 1.2. При этом поставка самих данных может осуществляться на основании концепций, представленных в 1.3. Дополнительным риск-фактором может выступить то, что вся операционная деятельность по поставке данных с площадки должна осуществляться в привязке к геолокации. Негативным фактором данного риска является то, что в местах проведения строительных работ промышленных объектов (взять современные мегастройки на территории РФ – ГХК в Усть-Луге, Амурский ГХК в Свободном, Курская АЭС – 2, АСММ в Усть-Куйге и тп.) возводятся в районах, где получение устойчивого сотового сигнала затруднительно, а применение спутникового сигнала сильно удорожит реализацию выбранных подходов вплоть до полной убыточности. Следовательно, в сложившихся условиях требуется альтернативный подход по оптимизации задачи управления парком активных систем.

Вторая техническая проблема. Рассмотренные концепции в 1.3 являются примерами односторонней интеграции активных сетевых структур в процесс полноценного управления конфигурацией. Задаются операционные данные и шаги их выполнения. При этом обратная связь в смене статуса конфигурационных данных осуществляется инкрементно. Можно уменьшить время поставки инкремента. Однако в сочетании с технической проблемой первой это можно вызвать определенные

организационные трудности. Дополнительным риском при решении второй технической проблемы можно определить тот фактор, что не все работы могут выполняться автоматизированно. Следовательно, поступающие данные будут поступать в разной степени обогащенности. Здесь же мы выделим риск, что поставщиком данных является тот факт, что их производят внешние источники по отношению к замкнутому контуру предприятия. Следовательно, остро встанет вопрос обеспечения как технической, так и кибернетической межсетевой взаимосвязанности.

Третьей глобальной задачей является выделение дополнительно риска из второй технической проблемы и совмещения его с фактором, описанным в разделе 1.3, который требуется присутствия человека. Безусловно существует общая кибернетическая связанность при производстве данных, их подготовке и передаче для интеграции в иерархическую структуру контура конфигурационного управления. Слабым местом в этой схеме является сильное влияние человеческого фактора. Следовательно, надо решить проблему по переносу в другую плоскость. Сменив плоскость решения операционного вопроса интерпретации данных для конфигурационного управления, может быть получено искомое решение.

В рамках проверки гипотезы о технической реализации решения задач и гипотезы о реализации было получено эмпирическое решение. Архитектурная схема решения представлена на рисунке 1.

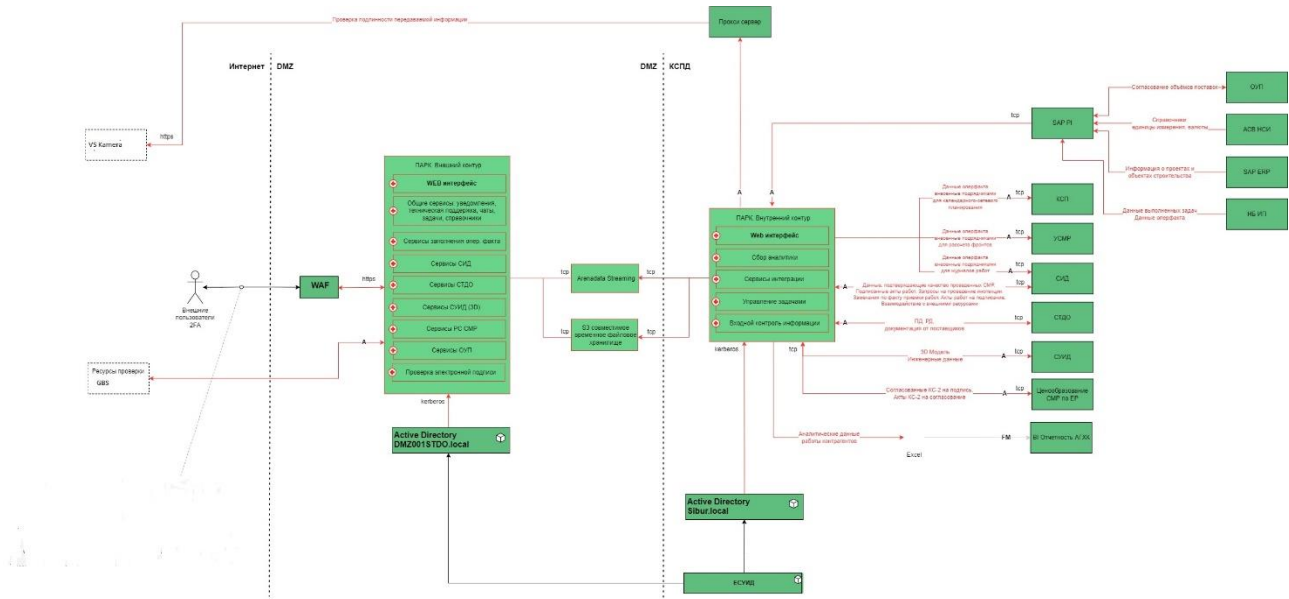


Рисунок 1. – архитектура решения

За основу был взят типовой инструментарий цифровых решений, сопровождающих выполнение строительно-монтажных работы на примере [24]. Подобная конфигурация является базовой для создания корпоративной сети передачи и хранения данных. То есть в совокупности представляют собой приемник. Дополнительно в схеме был рассмотрен другой технический вопрос. Доставка данных до конечного консолидатора может происходить в условиях межсетевого взаимодействия. Итоговая информационная модель должна и будет в себя включать как полные, так и не полные данные, а также данные элементов конфигурации, с различным степенью гранулярности. В условиях подобной неопределенности важно снизить влияние рисков и человеческого фактора в целом. Сама же передача данных может быть организована как в автоматическом режиме, так и в ручном, с использованием загрузочных механизмов и оператора. Для этого используется система или подсистема приемник информации. Примером такого решения может быть CRM-система, позволяющая записывать данные непосредственно в базы данных обработчика информации, или слой API или интеграционный модуль, если предполагается интеграционная модель взаимодействия двух информационных систем. Данная система и в условиях ручного контроля обращения, и в условиях автоматического взаимодействия должна определять место, куда пишутся данные. При этом обратной реакцией организационной схемы работы с комплексом систем должно быть либо подтверждение, что все корректно, либо вынесение необходимости корректирующих действий на административном уровне или на уровне самих данных (например, выявленное несоответствие ВМ-модели), или реализация изменения (выявленное несоответствие на строительном контроле, которое может привести к переделке уже начатого строительного производства). То есть представим, что ИТ-архитектура предприятия обрела дополнительную компоненту, выраженную в отдельной информационной системе, соединенной со всеми системами заказчика, и обладает возможностью передавать обратные сведения в системы контрагента. Данная компонента технически взаимосвязана реализацией как часть активных систем как цифровая часть реализованного парка активных систем, выступая наравне с внешними источниками данных таким же поставщиком данных,

находясь в демитарелизованной зоне корпоративной сети передачи данных. Соединенная с консолидатором она позволяет как создавать данные, так и дообогачая уже поставленные данные. Безусловно, организация подобного рабочего пространства потребует организации трехконтурного взаимодействия между сегментами сети интернет и КСПД. Дополнительным вариантом использования формируемой активной системы может послужить семантическая проверка ссылочной связанности поступающих конфигурационных данных. Для этого будет требоваться создание дополнительной модели обучения, которая позволит работать с образами данных, которые в соответствии с парадигмой организации трехконтурного взаимодействия будут храниться в карантине S3 хранилища. Там же может производиться связь между поставляемыми данными. Представленная операция позволит выявлять несоответствия, которые являются частью общего процесса [4], [5], [6] и организовать работу в соответствии с общим планом по управлению конфигурации технически сложных объектов.

Рассмотрим основные шаги управления конфигурацией и как они предполагались к реализации в данной информационной среде. Основными шагами в соответствии с [7] являются идентификация, работа с требованиями, аудит, управление изменениями, учет статуса. В соответствии с выбранной технической парадигмой каждая из них реализуема на операционном уровне. Процесс верификации происходит следующим комбинированным процессом. Идентификация конфигурационных элементов осуществляется при реализации ВІМ модели. Каждому элементу присваивается свой уникальный опознавательный ІD и набор атрибутов в соответствии с моделью данных. Далее эта на операционном уровне задавалась рабочая программа по производству отдельных элементов в соответствии с ВІМ моделью, которая как раз являлась частью данной рабочей программы в соответствии с гипотезой [17]. На этом же уровне была организована работа по процессу работы с требованиями, поддержка выполнения которых на первых этапах осуществляется, безусловно, традиционными методами разработки документации по нормативам ТЭДО. Дальнейшая реализация работы с требованиями проводилась так же в соответствии с гипотезой [17] через операционную деятельность. Аудит и управление изменениями проводился в условиях проведения операционной деятельности и информационного обмена по парадигме [20]. Активным системам выдавалось операционное задание. По факту осуществления деятельности фиксировалось конечное состояние, в том числе определялась дельта между изменяемыми параметрами. Само изменение проводилось в соответствии со стандартными правилами СУІD или ТЭДО. Под изменением мы понимаем в данном контексте любое изменение атрибутивных параметров идентифицированных ранее элементов конфигурации. В том числе смена статуса при фиксировании факта реализации и перевода из состояния «проект» в состояние «физическая реализация» в цифровой модели данных. Учет статуса конфигурации осуществляется фактическим исполнением состояния конфигурации средствами информационных систем СУІD и ТЭДО. Валидация фактического состояния данных проводилась в усиление первых процессов. Все данные валидировались при приемке качества выполненных строительно-монтажных работ. Все обработанные данные поступали по рабочему производственному процессу системы подготовки исполнительной документации как часть принимаемых работ в актах и томах технической документации. Далее по процессу эти метаданные перерабатывались, поступая в единое хранилище, после согласования таковых, объединяясь с общей информационной моделью. В условиях отсутствия устойчивого сигнала для усиления определения GBS составляющей конфигурационных данных была настроена обработка сигнала с помощью стационарных камер видеонаблюдения смонтированных в строительной зоне. Дополнительно сигнал был обработан штатными средствами ІІІ предприятия, который помогал в автоматическом режиме определять элементы и их состояние. Оба потока сигнала и по процессу верификации, и по процессу валидации проходили через информационную систему-обработчик, где сопоставлялись по составу, консистентности. В том числе в этой буферной зоне производилось первичная идентификация изменений, которые получались при сравнении поступающих потоков. Такие изменения либо идентифицировались как несущественные, либо сразу предлагались как TQ по процессу ТЭДО. Таким образом полученный кибернетический контур для информации получался замкнутым.

Данная гипотеза была проверена на практике на трех строительных площадках. Площадки были выбраны с тем условием, что существующая ІТ инфраструктура соответствовала представлению [24] и в опытной эксплуатации на площадках присутствовал парк активных систем. После корректировок процессов были получены следующие результаты: количество выявленных несоответствий при контроле выполнения строительно-монтажных работ – снижено на 29%, процесс обработки TQ (от поступления запроса – снижен на 3,2 человеко-часа, снижения расхода материалов для выполнения строительно-монтажных работ – снижено на 12,7%, количество фиксируемых несоответствий при обработке технической документации – 42,1%, загрузка подразделения нормоконтроля – на 1,4 FTE. Сравнение происходило путем сравнения состояний «как есть» и «как будет» по выбранным метрикам.

При реализации подходов присутствовали определенные допущения. К примеру, робот-обходчик не позволял в должной мере осуществлять поставленные задачи. В кибернетической функциональной схеме верификации и валидации данных он был заменен на взаимодействие с системой мобильных обходов, доступных штатным сотрудникам строительных подразделений. При обработке поступающих данных

присутствовал временной лаг, т.к. существующие средства не позволяли интегрировать средства ИИ со средствами видеонаблюдения, поэтому обработка видеоизображения осуществлялась путем ручной обработки оператора. Видеосигнал поступал с задержкой в 4 часа. В силу причин обеспечения безопасности не было протестировано применение БМЛА при управлении GBS. Как видится в будущем, это может быть зоной роста.

### **3. Преимущества и вызовы**

Определенный порядок организации интеграции активных сетевых структур обладает рядом преимуществ, а именно:

- Внедрение подобной системы в общую ИТ-архитектуру и производственные процессы позволит снизить влияние человеческого фактора;
  - Позволит экономить время на проведение рутинных проверок и организационных мероприятий по управлению конфигурацией объекта капитального строительства;
  - Позволит организовывать работу с несоответствиями на уровне верификации/валидации данных;
  - Позволит удешевить обработку несоответствий на уровне человеческого ресурса и высвободить ФТЕ специалистов;
  - Позволит достигать более достижения целевого состояния внутренних систем заказчика за счет того, что часть функций, например проверок, перенесена в новую активную систему;
- Тем не менее, очевидно, что данный подход обладает рядом существенных недостатков, таких как:
- Сама реализация подобной схемы требует определенных материальных затрат на поддержку парка активных систем. Данная возможность должна быть оценена на уровне ТЭО с поисками серых зон и зон увеличения эффективности за счет средств lean;
  - Требуется более тщательный подход при организации интеграционного взаимодействия между активной системой и внутренними системами заказчика. Часть функций может быть реплицирована, что приведет к необходимости постоянно организовывать доработку обеих систем;
  - Требуется определенная работа по интеграционной настройке на уровне моделей данных для обеспечения всех реализуемых проверок;
  - Дополнительно может потребоваться реализация непосредственно сквозного процесса, описанного в 1.1 внутри самой системы.

### **4. Заключение**

В статье был рассмотрена возможность интеграции активных сетевых структур при управлении конфигурациями технически сложных объектов на примере объектов капитального строительства. Были определены сквозные процессы, которые определяют порядок управления составом технически сложного объекта. Так же были определены инструменты поставки данных при реализации производственных процессов, который сопровождают единый процесс. Дополнительно были идентифицированы существующие прообразы активные сетевые структуры внутри производственных процессов.

В разделе 2 был определен порядок интеграции активных сетевых структур на базе идентифицированных прообразов. Данный порядок обладает рядом преимуществ и недостатков, которые определены в разделе 3 на основе полученного опыта.

Данное направление перспективно для изучения и практической реализации как альтернатива существующему инструментарию коммуникации разрозненных информационных систем и технических средств взаимодействия в рамках реализации целевого процесса управления конфигурациями объектов капитального строительства, которые при должной реализации смогут помочь увеличить эффективность вовлекаемых ресурсов как с точки зрения реализации проекта, так и с точки зрения привлечения человеческого ресурса на сопровождение менеджмента конфигурациями, так и на непосредственно вовлеченных в строительство.

## Литература

1. Свод правил. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. СП 333.1325800.2020
2. Градостроительные кодексы РФ. Статья 48.1. Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты
2. *Королев А.С., Кубарская А.А.* Инструментарий управления конфигурациями в проектах АЭС. // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD, Москва, 2019:
3. <https://ipxhq.com/training/cm2-certification-courses/the-cm2-platform> (дата обращения: 05.09.2024)
4. IAEA-TECDOC-1335 Configuration management in nuclear power plants, IAEA, 2003
5. ISO 10007:2017 International standard Quality management — Guidelines for configuration management
6. ГОСТ Р 59193-2020 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ УПРАВЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЕЙ Основные положения Configuration management. General provisions
7. ISO/TS 12911:2023 International standard Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Framework for specification of BIM implementation
8. ГОСТ Р 57563-2017/ISO/TS 12911:2012 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ «Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений Buildings and structures information modeling. General principles for the development of buildings and constructions information modelling standards
9. СП 331.1325800.2017 Свод правил «Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах» Building information modeling. Modeling guidelines and requirements of exchange data between building information models and application package models (приказ от 18.09.2017 г. № 1230/пр).
10. СП 333.1325800.2020 СВОД ПРАВИЛ ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла Building information modeling. Modeling guidelines for various project life cycle stages (приказ от 18.09.2017 г. № 1230/пр)
11. *Павлов В.Д.* Применение технологии Multi-D для управления жизненным циклом сложных инженерных объектов // BIM-МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ (BIMAC 2023) Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года
12. *Литвиненко Е.В., Устюжанина И.А.* Применение информационного моделирования зданий (BIM-технологий) в России // Экономика и бизнес, 2015
13. *Чистякова Т.Б., Фураев Д.Н., Полосин А.Н., Зациринский С.В.* Применение виртуальной и дополненной реальности для автоматизированного проектирования и управления в нефтехимической и полимерной промышленности // Автоматизация в промышленности, 2021
14. *Азаров Б.Ф., Опара В.В.* BIM-технологии: проектирование, строительство, эксплуатация // Ползуновский альманах, 2018
15. *Пылсарь М.С.* Технологии информационного моделирования BIM. Практика применения в Российской Федерации // Сборник научных статей «Цифровое пространство: экономика, управление, социум», Смоленск, Смоленский государственный университет, 2021, с.147-153
16. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ. М.: Синтег, 1999. – 128 с.
17. <https://www.automate.org/>
18. <https://geoinfo.ru/products-pdf/primer-ispolzovaniya-geodezicheskogo-drona-dlya-kontrolya-ehffektivnosti-rabot-v-zolotorudnom-karere.pdf>
19. *Кравцова О.А., Левкевич И.Ю.* Внедрение робототехнических систем в строительстве // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства, 2021, Гродно, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, с.216-219
20. <https://gumich-rtk.ru/resheniya/gumich-specialist-obhodchik/>
21. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 60.6.1.1-2023 Роботы и робототехнические устройства. Транспортные логистические роботы. Функциональные требования.
22. *Третьяков Д.В., Чижеменко Р.И., Паксютов В.В.* Робот для ремонта трещины в конструкции // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2022 с.168-174
23. <https://udrbrokk.ru/stroitelstvo>
24. *Tribelev A.A., Serova A.S.,* Model organization of enterprise corporate architecture for implementation of integrated management and production of executive documentation in digital format // International Journal of open information technologies ISSN: 2307-8162, vol.12, 2024, с.105-115
25. *Бородулин А.Н., Заложнев А.Ю., Шуремов Е.Л.* Основные объекты применения информационных технологий к оптимизации бизнес-процессов // Сборник трудов "Управление большими системами", Выпуск 17. Москва. ИПУ РАН, 2007. С. 40

# ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Угольницкий Г.А.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

gaugolnickiy@sfedu.ru

*Аннотация. Приведён краткий обзор исследований проблемы согласования интересов при управлении организационными системами. Устойчивое развитие организационной системы определяется как одновременное выполнение условий жизнеспособности системы и заинтересованности активных агентов. Изложена авторская методология моделирования, охарактеризованы области исследования и полученные результаты. Представлен план дальнейших исследований и ожидаемые результаты.*

*Ключевые слова: динамические игры, согласование интересов, управление организационными системами*

## Введение

Выделим следующие области исследований по согласованию интересов активных агентов, наиболее близкие к представленной авторской тематике: теория активных систем; информационная теория иерархических систем; теория контрактов и дизайн механизмов. В основополагающей статье [1] поставлена задача метаигрового синтеза, при котором Центр стремится так определить игру между остальными элементами системы, чтобы в равновесной точке достигался максимум его собственного выигрыша. Эта задача решена для распределения ресурсов в древовидной системе управления, но дальнейшего развития практически не получила. В рамках теории активных систем [2] и теории управления организационными системами [3,4] разработан ряд механизмов управления в системах с активными агентами, исследованы их свойства, проведена апробация в реальных системах организационно-экономического управления. Доклад развивает динамические модели управления организационными системами.

В статье [5] рассмотрена модель, в которой функция выигрыша агента включает два слагаемых – его частный интерес и общий интерес всех игроков. Если используется свёртка по минимуму, то в игре существует Парето-оптимальное равновесие по Нэшу, то есть интересы игроков могут быть идеально согласованы. В дальнейшем [6,7] была построена математическая теория управления в иерархических системах на базе принципа гарантированного результата при различных предположениях о взаимной информированности игроков, доказана теорема Гермейера о виде  $\epsilon$ -оптимальной гарантирующей стратегии в игре  $\Gamma_2$ , т.е. при наличии обратной связи по управлению. Исследованы вопросы согласования интересов центра и подсистем, предложен коэффициент согласованности интересов, близкий к рассмотренному в работе [2], введено понятие идеальной согласованности интересов.

Основной моделью теории контрактов выступает схема принципал-агент в различных модификациях - модели «скрытого знания» (adverse selection), «скрытого действия» (moral hazard) и «непроверяемости» (nonverifiability) [8]. Главная решаемая задача – построение механизма мотивации (оптимального контракта), посредством которого принципал обеспечивает выполнение агентом некоторой нужной для себя (принципала) работы с наименьшими затратами на её оплату. Ключевой особенностью моделей принципал-агент является информационная асимметрия субъектов, в силу которой сообщение агентом принципалу некоторых данных становится стратегией агента, обеспечивающей последнему информационную ренту. Важнейшую роль играет принцип раскрытия информации (revelation principle), согласно которому любой механизм в моделях adverse selection и moral hazard эквивалентен некоторому неманипулируемому механизму, в котором всем агентам выгодно сообщать истинную информацию. В теории активных систем этот принцип был открыт независимо как «принцип открытого управления».

Дизайн механизмов направлен на создание экономических механизмов координации, благодаря которым эгоистическое поведение независимых агентов приводит к максимизации общественного благосостояния, и исследование свойств таких механизмов [9,10]. Основные результаты: аукцион второй цены Викри, механизм Викри – Кларка – Гроувза, правило ведущего элемента Кларка, использование принципа раскрытия информации, построение мотивационно совместимых механизмов, «борьба» с теоремой Гиббарда – Саттертуэйта (механизмы без денег), комбинаторные аукционы, разделение затрат, обеспечение вычислительной эффективности механизмов, в т. ч. распределённых и онлайн-овых, и др. Особо следует отметить понятие «цены анархии» [11], дающее количественную характеристику соотношения общественного благосостояния при эгоистическом и кооперативном поведении агентов, и ряд исследований этой величины в сетевых играх [12].

Основные авторские результаты изложены в монографиях [13-22].



## 1. Методология моделирования

Объектом моделирования выступает динамическая организационная система (расширенная активная система), состоящая из активной управляющей подсистемы и пассивного динамического объекта управления. Модель управления представляет собой динамическую игру, в которой изменение состояния объекта управления описывается системой дифференциальных или разностных уравнений, а интересы активных агентов - интегральными или суммарными функционалами выигрыша.

К состоянию объекта предъявляются определённые условия жизнеспособности, отражаемые фазовыми ограничениями. Выполнение этих условий (достижение цели управления) требует заинтересованности всех активных агентов из управляющей подсистемы, что выражается решением игры. Совместное удовлетворение условий жизнеспособности и заинтересованности определяет устойчивое развитие организационной системы.

Поскольку обычно интересы агентов не связаны с условиями жизнеспособности, то вводится специальный выделенный агент (Центр), ответственный за обеспечение этих условий. Центр может иметь собственные интересы, что порождает иерархическую игру Центра и агентов. Для обеспечения жизнеспособности Центр применяет административное управление (принуждение), т.е. воздействие на множества допустимых действий агентов, и экономическое управление (побуждение), т.е. воздействие на их функционалы выигрыша.

## 2. Области исследования и полученные результаты

Исследования включают семь взаимосвязанных направлений (*задач*) в области теоретико-игровых моделей и технологий управления организационными системами.

1. Сравнительный анализ эффективности способов организации активных агентов и методов управления организационными системами.

2. Динамические теоретико-игровые модели согласования общественных и частных интересов (СОЧИ-модели) при распределении ресурсов.

3. Динамические теоретико-игровые модели борьбы с оппортунистическим поведением в организационных системах.

4. Динамические теоретико-игровые модели согласования интересов с учётом сетевой структуры взаимодействия игроков.

5. Вычислительно-экспериментальные методы решения динамических задач оптимального и конфликтного управления с фазовыми ограничениями.

6. Стохастические модели процессов с разладкой и неопределённой изменчивостью, допускающие применение стохастической оптимизации и машинного обучения в реальном времени для оптимального управления финансовыми организациями и рынками (оптимальное инвестирование и диверсификация риска).

7. Оптимизация с учётом дополнительной информации.

С практической точки зрения результатом исследований по указанным направлениям станет разработка практико-ориентированных *технологий управления* на базе информационно-аналитических систем с их последующим внедрением в соответствующей предметной области, что обеспечит ускоренное инновационное развитие экономики при выполнении социальных и экологических требований.

Технологии управления не менее (на самом деле более) важны, чем собственно инженерные технологии, поскольку без них ничего реально внедрить не получится. Чиновники будут продолжать воровать, брать взятки, саботировать указы Президента, предприниматели - жадничать и идти по самому простому пути финансовых спекуляций и продажи сырьевых ресурсов, а работники - лениться и халтурить. Технологии управления принуждают и/или побуждают активных агентов к достижению целей, необходимых обществу и государству. Конечно, способы достижения этих целей имеют политический характер и требуют проведения существенных социально-экономических реформ. Однако, решение политических задач не входит в академическую компетенцию и в любом случае требует научно обоснованной управленческой поддержки.

Наибольшее внимание будет уделено следующим областям приложений:

- динамические модели стимулирования при управлении в организационных системах;
- модели олигополии Курно с учётом воздействия на окружающую среду и сетевой структуры взаимодействия игроков;
- управление эколого-экономическими системами: контроль качества водных ресурсов, в частности, управление реабилитацией мелководных водоёмов; управление загрязнением атмосферы; модели оптимального рыболовства;
- оптимальное управление финансовыми активами организации: анализ задачи о выборе портфеля активов с учётом дополнительной информации;

- управление рынком электроэнергии: назначение цен на электроэнергию; моделирование ценообразования на рынке электроэнергии;
- анализ международных отношений: выявление условий существования одного или нескольких центров силы (полюсов), принципы оптимальности распределения выигрыша, балансирование на грани, устойчивость достигнутых соглашений.

К настоящему времени получены следующие результаты.

1. Разработана методика исследования задачи управления устойчивым развитием активных систем, описывающая этапы построения и решения соответствующих динамических теоретико-игровых моделей. Математическая формализация задач управления устойчивым развитием активных систем использует дифференциальные и разностные игры в нормальной форме, форме характеристической функции и игры с иерархической структурой. Проведён сравнительный анализ различных способов организации активных агентов (независимое поведение, кооперация и иерархическое управление). Дано обобщение статических моделей стимулирования в дискретной и непрерывной динамической стохастической постановке для случаев одного и нескольких агентов. Результаты о виде оптимального механизма управления с естественными изменениями сохраняют силу при этом обобщении.

2. Построена статическая теория моделей согласования общественных и частных интересов (СОЧИ-моделей) при распределении ресурсов. Получен ряд результатов о свойствах административных и экономических механизмов управления согласованием интересов. Проведено имитационное численное исследование ряда конкретных динамических СОЧИ-моделей в различных предметных областях (продвижение инноваций, управление качеством водных ресурсов, рыболовство, социальное партнёрство, борьба с коррупцией). Предложена концепция региональной активной системы, проведён анализ согласования интересов субъектов Южного федерального округа и участников проектов государственно-частного партнёрства.

3. Разработана концепция моделирования коррупции в иерархических организационных системах на основе теории управления устойчивым развитием активных систем, её основные положения апробированы при построении конкретных моделей. Построены и исследованы теоретические статические модели административной и экономической коррупции в одно-, двух- и трёхуровневых системах управления (ряды моделей вида «задача оптимизации – иерархическая игра двух лиц – иерархическая игра трёх лиц»). Обосновано различие между указанными типами коррупции и между попустительством и вымогательством при математической формализации. Предложены показатели сговорчивости и жадности взяточника. Найдены зависимости стратегий поведения взяточника от параметров модели и сформулированы соответствующие рекомендации по ограничению коррупции. Построены и исследованы теоретические динамические модели административной и экономической коррупции в одно-, двух- и трёхуровневых системах управления (ряды моделей вида «задача оптимального управления – динамическая иерархическая игра двух лиц – динамическая иерархическая игра трёх лиц»). Даны определения равновесий принуждения и побуждения с учётом требований устойчивого развития при коррупции, предложены алгоритмы их нахождения. Эти алгоритмы имеют общее значение как инструмент исследования иерархических дифференциальных игр с различными информационными регламентами. Построены и исследованы статические оптимизационные и теоретико-игровые модели управления инвестиционно-строительными проектами в условиях коррупции, реализован и апробирован соответствующий программный комплекс, на основе чего получены рекомендации по борьбе с коррупцией в указанной области. Построены и исследованы: модели управления качеством производственных систем различной структуры в условиях коррупции, динамические ряды моделей управления качеством водных ресурсов и эксплуатации биологических ресурсов в условиях коррупции, модели распределения ресурсов в иерархических системах управления с учётом коррупции, модели борьбы с коррупцией при проведении аукционов.

4. Предложена методология постановки и решения задач оптимального и конфликтного управления на когнитивных сетевых моделях. Построены и исследованы модели управления мнениями и распределения ресурсов в маркетинговых сетях. Предложена теоретико-игровая формализация активной сети с учётом требований устойчивого развития. Проведён системный анализ и построена концептуальная модель управления устойчивым развитием территориальных активных систем с учётом их сетевой структуры; макроэкономическая модель Солоу модифицирована в региональную модель с учётом пространственного аспекта и загрязнения окружающей среды; выполнены расчёты по модели для официальных статистических данных по Южному федеральному округу, сформулированы практические рекомендации.

5. Для ряда предметных областей апробирован авторский метод качественно репрезентативных сценариев имитационного моделирования, позволяющий ограничить перебор очень небольшим числом сценариев, обеспечивающих достаточно хороший качественный прогноз динамики управляемой системы при условии выполнения требований внутренней и внешней устойчивости множества сценариев по выигрышу и траектории. Разработаны итерационные методы построения равновесий Нэша и

Штакельберга, основанные на методе качественно репрезентативных сценариев, изучены задачи с пространственной неоднородностью по двум координатам.

6. Дано стохастическое определение гомеостаза (жизнеспособности) через вероятность невыхода случайного процесса из полосы. Предложен подход к вычислению этой вероятности с помощью метода Монте-Карло и факторизации Винера-Хопфа. Решены задачи о вероятности невыхода случайного процесса из полосы с применением метода Монте-Карло на случайной решётке. Изучен широкий класс задач оптимального управления стохастическими динамическими системами с разладкой. Исследована задача оптимального инвестирования с использованием статистической теории обучения, робастной оптимизации и нейронных сетей с использованием статистической теории обучения, робастной оптимизации, факторного анализа, метода главных компонент и нейронных сетей.

7. Предложена и апробирована на моделях распределения ресурсов модификация ряда методов случайного поиска (генетические алгоритмы, онлайн-обучение и обучение с подкреплением) для решения динамических игр, основанных на "липшицевой" гипотезе о недопустимости резких изменений управлений.

Объектом моделирования выступает динамическая организационная система (расширенная активная система), состоящая из активной управляющей подсистемы и пассивного динамического объекта управления. Модель управления представляет собой динамическую игру, в которой изменение состояния объекта управления описывается системой дифференциальных или разностных уравнений, а интересы активных агентов - интегральными или суммарными функционалами выигрыша.

К состоянию объекта предъявляются определённые условия жизнеспособности, отражаемые фазовыми ограничениями. Выполнение этих условий (достижение цели управления) требует заинтересованности всех активных агентов из управляющей подсистемы, что выражается решением игры. Совместное удовлетворение условий жизнеспособности и заинтересованности определяет устойчивое развитие организационной системы.

Поскольку обычно интересы агентов не связаны с условиями жизнеспособности, то вводится специальный выделенный агент (Центр), ответственный за обеспечение этих условий. Центр может иметь собственные интересы, что порождает иерархическую игру Центра и агентов. Для обеспечения жизнеспособности Центр применяет административное управление (принуждение), т.е. воздействие на множества допустимых действий агентов, и экономическое управление (побуждение), т.е. воздействие на их функционалы выигрыша.

### 3. План работы

1. Будут построены и исследованы оригинальные модели конкуренции-кооперации, властных иерархий, производственных инвестиций, балансирования на грани, распределения ресурсов, динамические модели стимулирования, оптимального инвестирования и диверсификации рисков. Основное внимание уделяется поиску условий согласования общественных и частных интересов и методам и алгоритмам решения иерархических динамических игр с различной информационной структурой с учётом фазовых ограничений.

2. Будет проведён сравнительный анализ выигрышей в динамических играх в нормальной форме с одновременным и последовательным принятием решений и играх в форме характеристической функции Неймана-Моргенштерна, Петросяна-Заккура, Громовой-Петросяна и иных. Основное внимание уделяется поиску общих условий выгодности того или иного способа организации активных агентов (конкуренция, кооперация, иерархия) с точки зрения отдельных агентов и организации (общества) в целом. Будет проведён анализ динамической устойчивости решений игры и при необходимости построена процедура распределения дележа по Л.А. Петросяну.

3. Будут получены условия невыгодности коррупции в динамических иерархических теоретико-игровых моделях с дополнительной обратной связью по управлению агентов, моделирующей взятки. Невыгодность коррупции означает динамическую неустойчивость кооперативного решения, соответствующего сговору.

4. Будут построены и исследованы динамические теоретико-игровые модели активных систем с сетевой структурой (активных сетей), проведён сравнительный анализ эффективности разных структурных конфигураций организационных систем.

5. Будут получены оценки точности при применении метода качественно репрезентативных сценариев имитационного моделирования для различных классов динамических моделей конфликтного управления с учётом их информационной структуры.

6. Будет проведено исследование моделей, адекватных актуальной нестабильности развития активных финансовых систем, в частности, моделей с неопределённой и стохастической волатильностью и моделей с разладкой, находящихся в фокусе современных научных интересов в области финансовой математики. В частности, будут получены вычислительные алгоритмы решения задач оптимального управления в моделях управления процессами с разладкой, стохастической и неопределённой

волатильностью. В этих алгоритмах будут применены методы бинарной аппроксимации траекторий, стохастической оптимизации и онлайн-обучения. Основные приложения – оптимальное инвестирование, диверсификация рисков. Будут получены алгоритмы прогноза и диверсификации рисков с применением метода главных компонент и факторного анализа данных. Будут исследованы классические задачи распределения риска между активами (портфельная идеология) и новые задачи распределения риска как игры между агентами в динамической постановке с использованием современных средств обучения в реальном времени. В рамках динамической диверсификации предполагается уделить внимание прогнозу значений параметров модели, необходимых для выбора оптимального портфеля, а также компонентному анализу для высокочастотных и многомерных портфелей. При назначении цен на ресурсы реакции агентов нижнего уровня (агентов) на действия лидера обычно определяются из решений их оптимизационных задач. В реальной ситуации целевые функции агентов лидеру не известны, и в своих решениях он должен опираться лишь на сами оптимальные решения (действия) агентов. В постановках без фазовой переменной предполагается рассмотреть две задачи, связанные с назначением цен на дефицитные ресурсы. В первой из них лидер максимизирует суммарную полезность агентов, а во второй – собственную полезность. В обоих случаях для решения задачи лидера предполагается применить алгоритмы онлайн-обучения. В динамических задачах с фазовой переменной действия агентов могут определяться их близоруким поведением или долгосрочными целями. Предлагаемый унифицированный подход состоит в реконструкции их действий по имеющимся данным, содержащим последовательности троек (фазовая переменная, действие лидера, действие агента). Предполагается использовать модели резервуарных вычислений (машины экстремального обучения, эхо-сети). Располагая восстановленной функцией реакций (действий) агента, лидер решает стандартную задачу оптимального управления. Фазы идентификации функции реакций выполняются последовательно или чередуются.

7. Будут разработаны методы назначения цен на электроэнергию с целью максимизации суммарной полезности участников рынка и достижения баланса в условиях неполной информации о функциях полезности и затрат агентов, а также с учётом имеющейся дополнительной информации. Будет проведён анализ методов учёта дополнительной информации в задачах о выборе портфеля активов и разработаны новые методы такого рода.

#### 4. Заключение

Представлена концепция согласования интересов при управлении организационными системами на основе динамических теоретико-игровых моделей. Совместное выполнение условий согласования интересов активных агентов и жизнеспособности динамического объекта управления определяет устойчивое развитие расширенной активной системы (динамической организационной системы). Базовая математическая модель представляет собой иерархическую динамическую игру с фазовыми ограничениями. Рассматриваются детерминированные и стохастические постановки в нормальной форме и в форме характеристической функции. Указаны основные направления исследований в этой области и полученные результаты, предложен план дальнейшей работы.

#### Литература

1. Бурков В.Н., Опоицев В.И. Метаигровой подход к управлению иерархическими системами // Автоматика и телемеханика. 1974. №1. С.103-114.
2. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. - М.: Синтег, 1999. - 128 с.
3. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. - М.: Издательство физико-математической литературы, 2007. - 584 с.
4. Механизмы управления / Под ред. Д.А. Новикова. - М.: Ленанд, 2011. - 192 с.
5. Гермейер Ю.Б., Ватель И.А. Игры с иерархическим вектором интересов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1974. №3. С.54-69.
6. Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. - М.: Радио и связь, 1982. - 144 с.
7. Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. - М.: Радио и связь, 1991. - 288 с.
8. Laffont J.-J., Martimort D. The Theory of Incentives. The Principal-Agent Model. - Princeton, 2002. - 421 p.
9. Николенко С.И. Теория экономических механизмов. - М.: Бином, 2009. - 207 с.
10. Algorithmic Game Theory / Ed. by N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, V. Vazirani. - Cambridge University Press, 2007. - 754 p.
11. Papadimitriou C.H. Algorithms, games, and the Internet // Proc. 33<sup>rd</sup> Symposium Theory of Computing, 2001, pp.749-753.
12. Roughgarden T. Selfish Routing and the Price of Anarchy. - MIT Press, 2005.

13. Угольников Г.А. Управление эколого-экономическими системами. - М.: Вузовская книга, 1999. - 132 с.
14. Мониторинг: от приложений к общей теории / Под ред. Угольникова Г.А. - Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2009. - 176 с.
15. Угольников Г.А. Иерархическое управление устойчивым развитием. - М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. - 336 с.
16. Угольников Г.А. Устойчивое развитие организаций. - М.: Издательство физико-математической литературы, 2011. - 320 с.
17. Ougolnitsky G. Sustainable Management. - N.Y.: Nova Science Publishers, 2011. - 288 p.
18. Дружинин А.Г., Угольников Г.А. Устойчивое развитие территориальных социально-экономических систем: теория и практика моделирования. - М.: Вузовская книга, 2013. - 224 с.
19. Горбанёва О.И., Угольников Г.А., Усов А.Б. Моделирование коррупции в иерархических системах управления. - Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2014. - 412 с.
20. Gorbaneva O.I., Ougolnitsky G.A., Usov A.B. Modeling of Corruption in Hierarchical Organizations. - N.Y.: Nova Science Publishers, 2016. - 276 p.
21. Угольников Г.А. Управление устойчивым развитием активных систем. - Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2016. - 940 с.
22. Модели управления устойчивым развитием активных систем и их приложения / Под ред. Г.А. Угольникова. - Ростов-на-Дону - Таганрог: изд-во ЮФУ, 2019. - 328 с.

# СТРАТЕГИЧЕСКИЕ АДАПТИВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МОБИЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Цыганов В.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
bbc@ipu.ru

*Аннотация. Разработан модульный подход к построению стратегических адаптивных механизмов мобилизации транспортного комплекса на основе фактических и целевых значений ключевых показателей его эффективности. Механизмы функционирования используемых модулей основаны на процедурах цифрового обучения. Развитый подход проиллюстрирован на примере оптимального синтеза механизма функционирования модуля «Специалист».*

*Ключевые слова: Транспорт, стратегия, управление, мобилизация, адаптация, моделирование, показатель эффективности.*

## Введение

Общие направления развития транспортного комплекса (ТК) Российской Федерации (РФ) определены Транспортной стратегией РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (ТСР) [1]. В условиях геополитического и санкционного давления на Россию, Правительство РФ мобилизует ресурсы для целевого развития ТК. В рамках ТСР, формируется единый национальный проект «Транспорт», который станет преемником заканчивающихся в 2024 г. национального проекта «Безопасные качественные дороги», Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры и других нормативных документов, регламентирующих развитие ТК РФ в краткосрочной перспективе. Тем самым, Правительство РФ сочетает стратегическое управление ТК на основе ТСР с адаптивным управлением ТК, учитывающим происходящие изменения. Тем самым, Правительство РФ реализует стратегический адаптивный механизм мобилизации транспортного комплекса (САМТ).

Кроме того, ТСР предусматривает создание цифровой системы мониторинга и управления развитием ТК. В соответствии с ТСР и стратегическим направлением цифровой трансформации ТК [2], Министерство транспорта РФ формирует, в структуре национального проекта «Транспорт», Федеральный проект цифрового развития ТК. В рамках последнего, должна быть проведена цифровизация механизмов и процедур САМТ. Вышесказанное обуславливает актуальность исследований и разработок теоретических и методологических основ построения цифрового САМТ.

## 1. Стратегические документы и ключевые показатели эффективности транспортного комплекса России

В ТСР определены миссия, приоритеты, цели и задачи развития ТК до 2030 г. и на прогнозный период до 2035 г. Главная цель ТСР — удовлетворение спроса общества и экономики на конкурентоспособные и качественные транспортные услуги. Другие стратегические документы, касающиеся ТК — государственные программы, национальные, федеральные, ведомственные и региональные проекты — ориентированы на достижение целей и решение задач ТСР.

Формально, состояние ТК характеризуют ключевые показатели эффективности транспорта (кратко – показатели, или КПЭТ) [1,2]. Упомянутые стратегические документы ТК ориентированы на достижение целевых значений этих показателей (кратко – планов). Например, основной инструмент достижения целей ТСР до конца 2024 г. — государственная программа «Развитие транспортной системы» [3] — предусматривает достижение целевых значений КПЭТ. Соответственно, ежегодно проводится анализ выполнения планов по этим показателям, и формируются планы на следующий год [4].

Основным инструментом достижения целей ТСР, начиная с 2025 г., станет национальный проект «Транспорт». При этом САМТ включает использование таких КПЭТ, как показатели общественно значимого результата и показатели стратегических направлений в области цифровой трансформации транспорта. Кроме того, ТСР предусматривает создание цифровой системы мониторинга и управления развитием транспортно-логистической инфраструктуры. В связи с этим, Министерство транспорта РФ разрабатывает, в рамках Федерального проекта цифрового развития ТК, национальную цифровую транспортно-логистическую платформу [5].

Заметим, что начатая в 2023 г. реформа государственного управления ориентирована на принятие решений на основе достоверных данных непосредственно из первоисточников [6]. В новой модели госуправления предполагается больше использовать первичные (а не обработанные) данные, исключив тем самым промежуточные звенья и связанные с ними нежелательные активности, а также другие помехи. По сути, речь идет о формировании прямой - двухуровневой системы госуправления, основанной на экономике данных [6].

Таким образом, в рамках новой модели госуправления, концепция цифрового САМТ предполагает планирование КПЭТ, количественную оценку выполнения каждого плана и стимулирование ответственных исполнителей на основе отклонений фактических значений КПЭТ от плановых.

Ввиду значительного числа документов, регламентирующих развитие транспорта в РФ и САМТ, большого числа КПЭТ в этих документах, а также множества факторов, влияющих на планирование этих КПЭТ, для реализации этой концепции на практике необходимо использовать эффективные методы *анализа* больших данных (такие, как машинное обучение и другие цифровые инструменты искусственного интеллекта). Но, главное — нужны научно обоснованные методы *синтеза* управлений и процедур принятия решений в САМТ.

## 2. Основы построения стратегических адаптивных механизмов мобилизации транспортного комплекса

### 2.1. Принципы и теоретические основы построения стратегических адаптивных механизмов мобилизации транспортного комплекса

Рассмотрим теоретические основы построения САМТ на базе совокупности принципов Прогрессивности, Организованности, Комплексности, Согласованности, Интеллектуальности, Мобилизованности, Адаптивности (кратко - ПРОКСИМА). Прогрессивность САМТ предполагает раскрытие потенциала лиц, принимающих решения при управлении ТК (ЛПР).

Организованность САМТ предполагает формирование организационной системы САМТ, обеспечивающей реализацию положений стратегических документов РФ. Эта система включает организационную структуру и механизмы её функционирования, которые должны обеспечить достижение целей ТСР. Эти механизмы должны включать процедуры, алгоритмы и программы, позволяющие эффективно формировать целевые значения и планировать КПЭТ, соответствующие стратегическим приоритетам ТК, а также выявлять и устранять отклонения КПЭТ от этих целевых значений и планов.

Комплексность САМТ предполагает всесторонний комплексный учет внешних факторов и воздействий при управлении ТК. Согласованность САМТ предполагает согласование интересов ЛПР. Интеллектуальность САМТ предполагает использование ЛПР технологий искусственного интеллекта (ИИ), в том числе цифрового обучения и адаптации.

Мобилизованность САМТ предполагает использование САМТ для мобилизации ресурсов и раскрытия резервов ТК в условиях геополитического и санкционного давления на Россию. Адаптивность САМТ предполагает использование ЛПР потенциала изменений при управлении ТК.

В рамках теории активных систем (ТАС), первые результаты разработки систем управления большими иерархическими организациями в условиях динамики, неопределенности, и с учетом человеческого фактора, основанные на концепции ПРОКСИМА, были опубликованы в [7]. Теория, методология и методы построения адаптивных механизмов отраслевого управления, основанных на ПРОКСИМА, разработаны в [8]. На базе этих механизмов, были разработаны теория, методология и методы управления эволюцией больших социально-экономических систем в условиях изменений [9].

Фундаментальные результаты, полученные в монографиях [7-9], легли в основу теории больших транспортных систем (БТС) [10]. Подход и метод теории БТС можно кратко сформулировать, перефразируя приведенные в [9] слова царя Соломона из Экклезиаста: «Управление БТС должно быть таким, чтобы те, кто владеет капиталом и обладает властью в БТС, делали то, что необходимо для БТС в целом».

### 2.2 Модули, механизмы и процедуры стратегической адаптивной мобилизации транспортного комплекса

Рассмотрим подход фундаментальной ТАС и прикладной теории БТС к построению САМТ. Как указывалось в разделе 1, императивом новой модели госуправления [6], основанной на экономике данных, является создание двухуровневых систем организационного управления. Соответственно, в основе САМТ, согласно ТАС, должны лежать механизмы и процедуры функционирования двухуровневой организационной системы «Центр – Активный элемент» (рис. 1). Роль Центра в ней играет полномочный орган управления (руководитель) субъекта, устанавливающего САМТ, а роль активного элемента (АЭ) – орган управления (руководитель) объекта управления, реализующего планы Центра. Предполагается, что руководитель объекта персонально ответственен за достижение целевых значений КПЭТ (т.е. выполнение планов), и обладает соответствующим капиталом и властью.

Выход объекта в периоде  $s$  характеризует показатель эффективности  $o_s$ , причем  $o_s \in [m_s, e_s]$ , где  $e_s$  – максимальный показатель выхода (потенциал) объекта,  $m_s$  – минимальный показатель выхода объекта (минимальные возможности),  $s=0,1,\dots$ . Величины  $m_s$  и  $e_s$  считаются случайными функциями внешнего воздействия на вход объекта (помехи), и поэтому неизвестны Центру и АЭ до периода  $s$ .

В начале периода  $s$  величины  $m_s$  и  $e_s$  становятся известны АЭ (оставаясь неизвестными Центру).

Кроме того, в начале периода  $s$  Центр сообщает АЭ управляющие воздействия: план  $p_s$  и ресурс  $f_s$  (например, финансовые средства). После этого АЭ выбирает показатель  $o_s \in [m_s, e_s]$ . Центр наблюдает  $o_s$  и, сопоставляя его с планом  $p_s$ , определяет стимул АЭ  $i_s = I(p_s, o_s)$ .

Далее, Центр определяет прогноз  $b_{s+1}$  на период  $s+1$ :  $b_{s+1} = A(b_s, o_s)$ ,  $b_0 = b^0$ , где  $A$  - функция, монотонно возрастающая по своим аргументам (процедура прогнозирования). На основе прогноза  $b_{s+1}$ , Центр определяет ресурс  $f_{s+1}$  и план  $p_{s+1}$  на период  $s+1$ :  $f_{t+1} = F(b_{s+1})$ ,  $p_{s+1} = P(b_{s+1})$ , используя процедуры выделения ресурсов  $F$  и планирования  $P$ . На этом функционирование системы в периоде  $t$  завершается, наступает период  $s+1$  и т.д.

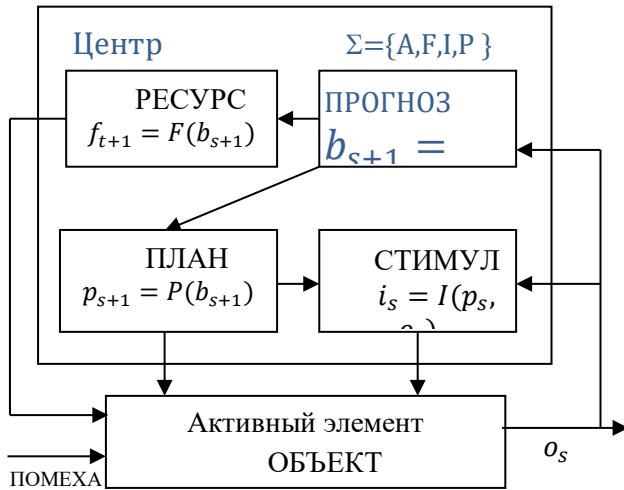


Рис.1. Базовый модуль

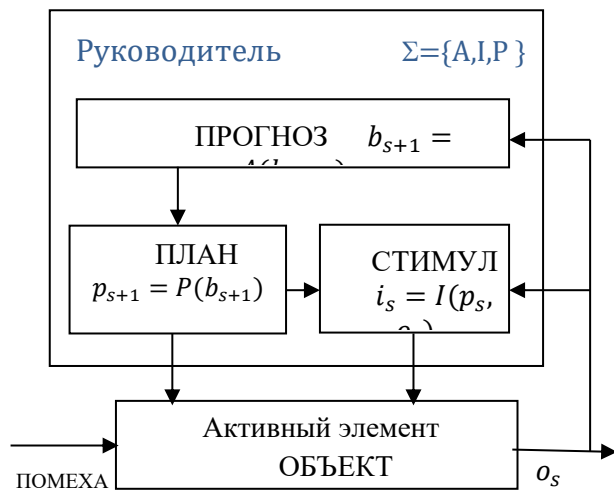


Рис.2. Модуль «Руководитель»

Механизм функционирования базового модуля  $\Sigma = \{A, F, I, P\}$  в двухуровневой системе «Центр – АЭ» представляет собой совокупность процедур прогнозирования  $A$ , выделения ресурсов  $F$ , планирования  $P$  и стимулирования  $I$ . В соответствии с ТАС, АЭ может проявить нежелательную для Центра активность, выбирая показатель  $o_s \in [p_s, e_s]$  так, чтобы обеспечить себе наибольшие стимулы сегодня и в перспективе. В связи с этим, возникает проблема оптимального синтеза механизма  $\Sigma = \{A, F, I, P\}$ , при котором АЭ выбирает показатель  $o_s \in [p_s, e_s]$  в интересах системы в целом (так, чтобы достигался максимум целевой функции Центра).

Путем упрощения базового модуля можно построить производные модули, которые также можно использовать при формировании сложного многофункционального САМТ. Например, модуль «Руководитель» - производный от базового модуля, в которой Центр уполномочен планировать задания и контролировать деятельность АЭ, но не обладает правом распоряжаться ресурсами. Поэтому процедура выделения ресурсов  $F$  у Руководителя отсутствует (рис.2).

Модуль «Специалист» получается из базового модуля, если Центр не наделен распорядительными функциями, так что у него отсутствуют процедуры выделения ресурсов  $F$  и планирования  $P$  (рис.3). Такой Специалист, обучаясь, накапливает знания о функционировании объекта и оценивает работу АЭ (рис.3).

Модуль «Ученик» - производный от базового модуля, в котором у Центра отсутствуют не только распорядительные функции выделения ресурсов  $F$  и планирования  $P$ , но и прогнозирование ( $A$ ) выполняется не самостоятельно, а с помощью консультанта. Рекомендации последнего  $c_t = C(o_t)$  в периоде  $s$  формируются на основе наблюдения показателя  $o_s$ . Ученик, обучаясь, накапливает знания о функционировании объекта и оценивает работу АЭ (рис.4).

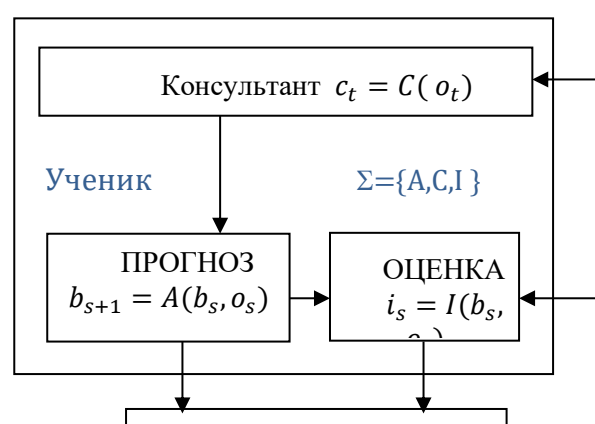
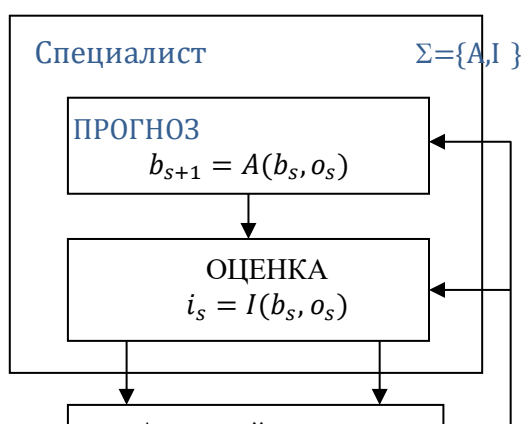




Рис.3. Модуль «Специалист»

Рис.4. Модуль «Ученик»

Теперь сложную многофункциональную организационную структуру стратегического адаптивного управления ТК можно представить в виде набора базовых и производных модулей, представленных на рис.1-4. Соответственно, подход к анализу и синтезу САМТ основан на исследовании механизмов  $\{A, F, I, P\}$ ,  $\{A, I, P\}$ ,  $\{A, I\}$ ,  $\{A, C, I\}$  и разработке их комбинаций.

Как указывалось в разделе 1, на практике необходимо использовать цифровые инструменты ИИ. Поэтому исследование механизмов  $\{A, F, I, P\}$ ,  $\{A, I, P\}$ ,  $\{A, I\}$ ,  $\{A, C, I\}$  и их комбинаций проводится в русле анализа и синтеза интеллектуальных механизмов функционирования (ИМФ), использующих процедуры цифровой адаптации и обучения [8,9]. В ИМФ информация об объекте, получаемая в процессе управления, используется для настройки процедур прогнозирования, распределения ресурсов, планирования и стимулирования АЭ, для достижения цели ТСР. Благодаря этому ИМФ способен со временем улучшать свою работу.

Необходимость в ИМФ возникает в случае, когда Центр должен работать в условиях неопределенности, а имеющаяся априорная информация настолько мала, что невозможно заранее спроектировать эффективный детерминированный механизм. Сбор, хранение и переработка информации об объекте в ИМФ необходима лишь в той минимальной степени, в которой информация требуется для достижения цели.

При построении ИМФ необходимо учитывать активность АЭ. Дело в том, что знание ИМФ позволяет АЭ предсказывать, в той или иной степени, будущие воздействия, в зависимости от выбора собственного состояния сегодня. Особенно важна степень использования Исполнителем потенциала объекта (производственного, финансового, коммерческого и др.) для достижения цели стратегического адаптивного управления ТК в целом.

### 2.3. Методологические основы построения стратегических адаптивных механизмов мобилизации транспортного комплекса

Методологически, САМТ формируется на основе принципов и концепции ПРОКСИМА [7-9] и теории БТС [10], а также модулей и механизмов, описанных в п.2.2. Например, в соответствии с принципом комплексности, следует исходить из научно обоснованных прогнозов обстановки в стране и мире в краткосрочной и среднесрочной перспективе. В свою очередь, чтобы сформировать такие прогнозы, нужно использовать научно обоснованные сценарии развития ТК РФ. Такие три сценария, связанные с нарастанием агрессивности Запада, мобилизацией и войной, были разработаны в конце 2010-х годов в Российской академии наук [11]. Последующие события подтвердили как правильность предпосылок, принятых при формировании этих сценариев, так и адекватность прогнозов, основанных на этих сценариях.

Сегодня российские власти и правящие элиты на практике реализуют сценарий мобилизации ТК РФ. Соответственно, требуется максимальное использование потенциала и раскрытие внутренних резервов ТК. Признание этого факта уже выразилось, например, в том, что комплекс моделей стратегического управления транспортной инфраструктурой Сибири, Дальнего Востока и российской Арктики – решительного поворота на Восток в условиях нарастания агрессии Запада и мобилизации – был отмечен Премией Правительства РФ за 2022 год в области науки и техники [12].

В соответствии с реализуемым сценарием, САМТ должен быть таким, чтобы исполнители задач, поставленных в стратегических документах, делали то, что необходимо для ТК в условиях мобилизации. Цели ТК указаны в стратегических документах. Соответственно, целями САМТ является достижение целей и целевых значений КПЭТ (планов), указанных в этих стратегических документах.

Функционирование САМТ призваны обеспечить механизмы функционирования структур управления ТК, включающих процедуры, алгоритмы и программы, использующих большие данные и технологии ИИ. Эти механизмы должны эффективно выявлять и устранять отклонения фактических показателей ТК от планов, указанных в стратегических документах. В результате, цифровой САМТ должен обеспечить достижение стратегических целей путем мобилизации ресурсов исполнителей, в том числе выполнение и перевыполнение планов, а также оперативное управление на основе отклонений фактических значений КПЭТ от плановых. Для этого ИМФ, входящие в САМТ, должны опираться на массив количественных данных – фактических и плановых значений ключевых показателей стратегических документов развития ТК.

Цифровая трансформация ТК создает предпосылки для управления ТК на основе количественных данных. Это позволяет применять ТАС и теорию БТС для анализа объектов управления и синтеза

механизмов управления (таких, как ИМФ). Кроме того, при управлении ТК в экономике данных, требуется обучение ЛПП при изменениях. Соответственно, анализ объекта и синтез управления осуществляется одновременно с обучением. В случае, когда одновременно происходит управление и обучение, говорят о дуальном управлении [9].

На практике, для обучения ЛПП применяют инструменты ИИ, главным образом, машинное обучение (МО). Однако, в 2010-х годах возник разрыв между теорией управления и МО [13]. Этот разрыв обусловлен чрезвычайной сложностью получаемых с помощью процедур МО многопараметрических интерполяционных зависимостей, характеризующих объект управления. Это сильно затрудняет синтез обратной связи, или даже делает его невозможным. С другой стороны, при наличии той или иной программы МО, возникает соблазн её использовать, чтобы избежать трудоемкого анализа объекта управления и синтеза системы управления (такой подход к управлению получил название безмодельного). Таким образом, возникает проблема совместного применения теории управления и МО при дуальном управлении.

Заметим, что МО основано на использовании больших данных. Поэтому МО не годится, если требуется дуальное управление в режиме реального времени. В этом случае, нужен иной подход к дуальному управлению. Такой подход реализуется в рамках теории БТС [10]. Его развитие, в сочетании с инжинирингом на основе моделей (Model Based System Engineering, или системотехникой) [14], привело к разработке ИМФ, подсистемами которых являются модели цифрового обучения и адаптации, имитирующие когнитивные функции ЛПП. А поскольку способность руководителя к обучению и адаптации является признаком естественного интеллекта, то цифровое обучение и адаптацию относят к технологиям ИИ. Таким образом, развитие ИМФ, входящих в САМТ, связаны с формированием новых направлений ИИ – цифровым обучением и адаптацией. Например, такого рода ИМФ БТС использовались:

- при анализе, сценарном моделировании и стратегическом управлении развитием инфраструктуры ОАО «РЖД»;
- при управлении стратегическим развитием инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики [12].

Чтобы разрабатывать ИМФ, входящие в САМТ, и обеспечивать их нужные свойства, необходимо формально описывать объекты управления, строить их адекватные модели и проводить их теоретический анализ.

### 3. Пример: разработка механизма функционирования модуля «Специалист»

ИМФ, входящие в САМТ, должны обеспечить эффективное планирование КПЭТ и реализацию соответствующих планов. Рассмотрим, в качестве примера, синтез механизма функционирования модуля «Специалист» (рис.3) применительно к задаче, связанной с классификацией АЭ.

#### 3.1. Бинарное ранжирование по показателю эффективности

Рассмотрим двухуровневую активную систему, на верхнем уровне которой находится специалист, принимающий решения (СПР), а на нижнем – АЭ, обеспечивающий процесс достижения целевого значения КПЭТ (плана). Обозначим через  $s$  период этого процесса,  $s = 0, 1, \dots$ . Пусть  $e_s$  – стационарный стохастический максимальный результат этого процесса (кратко - потенциал) (АЭ) в периоде  $s$ ,  $e_s \in E$ . Зная  $e_s$ , СПР принимает решение о присвоении АЭ одного из двух рангов (кратко - бинарном ранжировании АЭ). Формально, это означает присвоение АЭ, обеспечившему результат  $e_s$ , ранга  $r$ , если  $e_s$  принадлежит множеству  $E_r$ ,  $r = \overline{1, 2}$ ,  $\bigcup_{r=1}^2 E_r = E$ . Обозначим:

–  $T_1(a, e_s) = e_s - ax$  - потери СПР при ошибочном присвоении АЭ ранга 1 при результате  $e_s$ ,  $0 < x < 1$ ;

–  $T_2(a, e_s) = b(a - e_s)$  - потери СПР при ошибочном присвоении АЭ ранга 2 при результате  $e_s$ ,  $b > 0$ .

Здесь  $a$  – параметр, выбираемый СПР так, чтобы минимизировать риск. Ведь, проводя бинарное ранжирование АЭ в стохастический условиях, СПР рискует. При этом средний риск бинарного ранжирования

$$U(a) = \sum_{r=1}^2 \int_E T_r(a, e) u(e) de, \quad (1)$$

где  $u(e)$  – плотность распределения стационарной случайной величины  $e$ ,  $e \in E$ . Минимум (1) достигается при оптимальном параметре  $a^* = \underset{a}{\operatorname{Argmin}} U(a)$ .

Однако, если  $p(e)$  неизвестно, то и определить  $a^*$ , минимизируя (1), нельзя. В этом случае, в [16] предложена процедура стохастической аппроксимации, позволяющая получать оценки  $a_s$  величины  $a^*$ :

$$a_{s+1} = A(a_s, e_s) = \begin{cases} a_s + \gamma_s a & \text{if } e_s < (x + y)a_s / (y + 1) \\ a_s - \gamma_s b & \text{if } e_s \geq (x + y)a_s / (y + 1) \end{cases}, \quad a_0 = a^0, \quad t = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где  $\gamma_s > 0$ ,  $\sum_{s=0}^{\infty} \gamma_s < \infty$ . При этом

$$a_{s+1} = A(a_s, e_s) \xrightarrow{t} a^*, \quad s = 0, 1, \dots \quad (3)$$

На основе оценки  $a_s$ , определяется ранг АЭ на период  $s$ :

$$r_s = R(a_s, e_s) = \begin{cases} 1 & \text{if } e_s < (x+y)a_s/(y+1) \\ 2 & \text{if } e_s \geq (x+y)a_s/(y+1) \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2. Планирование показателя эффективности

Предположим теперь, что СПР знает не потенциал АЭ  $e_s$ , а результат АЭ  $o_s$ . Последний не может превышать потенциала:  $o_s \leq e_s$ . Пользуясь неполной информированностью СПР, АЭ может добиться лучшего ранга, манипулируя результатом  $o_s$ .

Формально, потенциал  $e_s$  становится известен АЭ на период  $s$ , перед выбором результата  $o_s$ . СПР же знает только результат  $o_s$ , которые, вообще говоря, не равен потенциалу  $e_s$ :  $o_s \neq e_s$ . Поэтому СПР вынужден проводить бинарное ранжирование, опираясь на известный  $o_s$ . Подставляя в (2)  $o_s$  вместо  $e_s$ , СПР получает оценки  $b_{s+1}$  величины  $a_{s+1}$  в следующем виде:

$$b_{s+1} = A(b_s, o_s) = \begin{cases} b_s + \gamma_s a & \text{if } o_s < (x+y)b_s/(y+1) \\ b_s - \gamma_s b & \text{if } o_s \geq (x+y)b_s/(y+1) \end{cases}, \quad b_0 = a^0, \quad s = 0, 1, \dots \quad (5)$$

По аналогии с (4), результатом бинарного ранжирования на период  $s$ , основанном на оценке  $b_s$  величины  $a_s$ , является оценочный ранг АЭ:

$$g_s = R(b_s, o_s) = \begin{cases} 1 & \text{if } o_s < (x+y)b_s/(y+1) \\ 2 & \text{if } o_s \geq (x+y)b_s/(y+1) \end{cases}, \quad s = 0, 1, \dots \quad (6)$$

По сути, величина  $p_s = (x+y)b_s/(y+1)$  - это плановое значение результата (план)  $o_s$ , в зависимости от которого производится ранжирование на период  $s$ ,  $s = 0, 1, \dots$ . Отсюда, подставляя  $b_s = p_s(y+1)/(x+y)$  в (5), получаем процедуру формирования плана  $p_{s+1}$  на период  $s$  в виде:

$$p_{s+1} = P(p_s, o_s) = \begin{cases} p_s + v_s x & \text{if } o_s < p_s \\ p_s - v_s y & \text{if } o_s \geq p_s \end{cases}, \quad p_0 = a^0(x+y)/(y+1), \quad s = 0, 1, \dots, \quad (7)$$

где  $v_s = \gamma_s(x+y)/(y+1)$  - коэффициент изменения плана,  $p_0$  - начальное значение плана при  $s = 0$ . Наконец, подставляя в (6)  $b_s = p_s(y+1)/(x+y)$ , получаем оценочный ранг АЭ на период  $s$ :

$$g_s = R(p_s, o_s) = \begin{cases} 1 & \text{if } o_s < p_s \\ 2 & \text{if } o_s \geq p_s \end{cases}, \quad s = 0, 1, \dots \quad (8)$$

Совокупность процедур планирования  $P(p_s, o_s)$  (5) и ранжирования  $R(p_s, o_s)$  (8) назовем механизмом самообучения бинарному ранжированию  $B = \{P, R\}$ .

В общем случае  $o_s \neq e_s$ , так что  $b_s \neq a_s$ ,  $s = 1, 2, \dots$ . Поэтому оценка  $b_s$ , рассчитываемая согласно (5), не сходится к оптимальной оценке  $a^*$ , определяемой согласно (3). Таким образом, возникает проблема определения  $a^*$ . Её причина - в том, что СПР не знает потенциал, зависящий от стохастических факторов. Такое незнание не только уменьшает результат АЭ, но и делает процедуру (5) неэффективной.

### 3.3. Решения активного элемента о показателе эффективности

При заданном механизме самообучения бинарному ранжированию  $B = \{P, R\}$ , АЭ выбирает результат  $o_s$  на период  $s$  так, чтобы увеличить свою целевую функцию  $Q_B(g_s, \dots, g_{s+S})$ , монотонно возрастающую при увеличении текущего и  $S$  будущих оценочных рангов.

При этом АЭ должен принять гипотезы относительно будущих параметров  $Q_B(g_s, \dots, g_{s+S})$ , таких как потенциал  $e_f$  и результат  $o_f$  в будущих периодах,  $f = s+1, s+S$ . Естественно предполагать, что АЭ ориентируется на выбор наилучшего для себя  $o_f$  при любом  $e_f$ ,  $e_f \in E$ . Кроме того, будем предполагать, что АЭ рассчитывает на реализацию самых неблагоприятных значений  $e_f$ ,  $f = s+1, s+S$ . При таких гипотезах, выбирая  $o_s$ , АЭ ориентируется на максимальное гарантированное значение целевой функции на период  $s$ :

$$q_s(o_s, B) = \min_{e_f \in E, f=s+1, s+S} \max_{o_f \leq e_f, f=s+1, s+S} Q_B(g_s, \dots, g_{s+S}). \quad (9)$$

В результате АЭ делает выбор  $o_s^*$  так, чтобы увеличить (9). Тогда множество возможных выборов АЭ на период  $s$ :

$$D_s(e_s, B) = \{o_s^* \leq e_s \mid q_s(o_s^*, B) \geq q_s(o_s, B), \quad o_s \leq e_s\}. \quad (10)$$

Далее будем предполагать, что справедлива гипотеза благожелательности АЭ по отношению к СПР: если множеству (10) содержит потенциал  $e_s$ :  $e_s \in D_s(e_s, B)$ , то АЭ выбирает  $o_s^* = e_s$ ,  $s = 0, 1, \dots$

### 3.4. Механизм самообучения бинарному ранжированию по показателю эффективности

Обратимся к текущей практике управления развитием ТК. Во-первых, процедуры оценки, планирования, ранжирования и стимулирования обычно разрабатываются таким образом, чтобы стимулы росли по мере увеличения результатов, по сравнению с планами. Обычно стимулирование проводится при условии превышения плана [4]. Следовательно, чем выше план, тем сложнее получить стимул.

Во-вторых, процедура прогнозирования обычно организована таким образом, что план в каждом последующем периоде увеличивается, по сравнению с текущим результатом (так называемое

«планирование от достигнутого уровня»). Тогда будущий план будет тем выше, чем выше сегодняшний результат. Поэтому АЭ может быть не заинтересован в превышении планов (поскольку чем выше будущий план, тем сложнее будет получить стимул). Таким образом, возникает проблема незаинтересованности АЭ в достижении максимально возможного результата. В этом случае  $o_s \neq e_s$ , и не удастся определить  $a^*$ .

**Теорема.** Механизм самообучения бинарному ранжированию  $B = \{P, R\}$ , включающий процедуру планирования (7) и процедуру ранжирования (8), обеспечивает максимальный выход АЭ:

$$o_s^* = e_s, \quad s = 0, 1, \dots \quad (11)$$

При этом оценки  $b_s, s = 1, 2, \dots$ , получаемые из (5), сходятся к оптимальной оценке  $a^*$ :

$$b_s \xrightarrow{s} a^*. \quad (12)$$

**Доказательство.** При механизме  $B = \{P, R\}$ , целевая функция АЭ  $Q_B(g_s, \dots, g_{s+S})$  на период  $s, s = 0, 1, \dots$ , зависит от текущих и будущих оценочных рангов  $g_h = R(p_h, o_h), h = s, s + \bar{S}$ . По определению (8), с ростом  $o_s$ , текущий оценочный ранг АЭ  $g_s = R(p_s, o_s)$  возрастает (не убывает).

Далее, СПР использует процедуру планирования (7), при которой план  $p_f$  убывает (не возрастает) с ростом  $o_s$  при  $f = \overline{s + 1, s + \bar{S}}$ . Но, согласно (8), с уменьшением плана  $p_f, g_f = R(p_f, o_f)$  растёт (не убывает). Таким образом, все будущие оценочные ранги АЭ  $g_f = R(p_f, o_f)$  возрастают (не убывают) с ростом  $o_s$  при  $f = \overline{s + 1, s + \bar{S}}$ .

Следовательно, текущий и будущие ранги  $g_h, h = \overline{s, s + \bar{S}}$ , возрастают (не убывают) с ростом  $o_s$ . С другой стороны, целевая функция АЭ  $Q_B(g_s, \dots, g_{s+S})$  монотонно возрастает по  $g_h, h = \overline{s, s + \bar{S}}$ . Поэтому, с ростом  $o_s$  возрастает (не убывает) и целевая функция АЭ. Поскольку  $o_s \leq e_s$ , то максимум  $Q_B(g_s, \dots, g_{s+S})$  достигается при  $o_s = e_s$ . Следовательно,  $e_s \in V_t(e_s, B)$ . Но тогда, в силу гипотезы благожелательности,  $o_s^* = e_s, s = 0, 1, \dots$  так что выполняется (11).

Кроме того, сопоставляя (2) и (5), при  $o_s^* = e_s$  получаем, что  $b_s = a_s, s = 0, 1, \dots$ . Тогда, подставляя  $b_s$  вместо  $a_s$  в (3), получаем  $b_{s+1} = A(b_s, e_s) \xrightarrow{s} a^*$ , т.е. выполняется (12), ч.т.д.

### 3.4. Обсуждение результатов

Дадим содержательную трактовку теоремы. Пусть  $o_s$  – результат организации-исполнителя, ответственной за достижение целевого значения КПЭТ в периоде  $s$ , а  $e_s$  – максимально возможный КПЭТ. Неопытный СПР формирует оценку приемлемого результата организации на период  $s$  – план  $p_s$ . По результатам её достижения, СПР оценивает работу организации и её руководства. Если результат  $o_s$  не ниже плана  $p_s: o_s \geq p_s$ , то организации присваивается высокий ранг ( $g_s = 2$ ), и её руководство поощряется. В противном случае ранг  $g_s = 1$ , и руководство наказывается. Тогда, согласно (11), механизм самообучения бинарному ранжированию  $B = \{P, R\}$  обеспечивает максимально возможный КПЭТ.

Заметим, что принимая решение, СПР рискует: ошибочное поощрение влечет за собой потери  $T_1$ , а ошибочное наказание – потери  $T_2$ . Минимум риска обеспечивает знание оптимального параметра принятия решений  $a^*$ . Однако для этого надо знать  $u(e)$  – плотность распределения стационарной случайной величины  $e$ , которая неопытному СПР не известна. Более того, СПР неизвестен максимально возможный КПЭТ  $e_s$ . Поэтому СПР не может сформировать последовательность оценок  $a_s$ , сходящихся к оптимальному параметру  $a^*$ .

В этих условиях, СПР стремится максимально приблизить свои решения к оптимальным, наблюдая результат организации  $o_s$ , и последовательно формируя приближения  $b_s$  к оценке  $a_s$  оптимального параметра  $a^*$  в каждом периоде  $s$ . При выполнении условий теоремы, эти приближения  $b_s$  сходятся к оптимальному параметру  $a^*$ , согласно (12). Тем самым, минимизируется риск СПР. Таким образом,  $b_s$  – это наилучшая оценки оптимального параметра  $a^*$  в периоде  $s$ , минимизирующая риск неопытного СПР. Таким образом, механизм самообучения бинарному ранжированию  $B = \{P, R\}$ , удовлетворяющий условиям теоремы, обеспечивает максимально возможный КПЭТ, а также эффективное планирование и получение корректных оценок, минимизирующих риски СПР.

## 4. Заключение

Состояние транспортного комплекса (ТК) характеризуют его ключевые показатели эффективности (КПЭТ). Стратегические документы РФ о развитии ТК ориентированы на достижение целевых значений КПЭТ. В условиях геополитического и санкционного давления на РФ стратегический адаптивный механизм мобилизации транспортного комплекса (САМТ) призван обеспечить централизованное управление развитием ТК с помощью планов, настраиваемых на достижение этих целевых значений.

В соответствии с концепцией экономики данных, САМТ является цифровой подсистемой стратегического управления ТК, опирающейся на массив количественных данных – фактических и целевых значений ключевых КПЭТ. Ввиду множества КПЭТ в стратегические документах, цифровой

САМТ нуждается в эффективных методах анализа больших данных. Но, в первую очередь, требуются научно обоснованные методы синтеза управлений и алгоритмов принятия решений в САМТ.

Рассмотрены теоретические основы построения САМТ на базе принципов прогрессивности, организованности, комплексности, согласованности, интеллектуальности, мобилизованности и адаптивности. Разработан подход к формированию сложного многофункционального САМТ на основе базового и производных от него модулей. Механизмы функционирования этих модулей основаны на процедурах цифрового обучения. Развитый подход проиллюстрирован на примере оптимального синтеза механизма функционирования модуля «Специалист», обеспечивающего цифровое адаптивное планирование и классификацию ответственного исполнителя КПЭТ, в зависимости от выполнения плана. При этом минимизируются риски органа управления ТК и раскрывается потенциал исполнителя.

Полученные результаты позволяют определить и сформировать научно обоснованные требования к составу, структуре, функционалу и характеристикам компонентов САМТ, способствуя переводу в практическую плоскость работ по обеспечению функционирования ТК РФ.

## Литература

1. Транспортная стратегия РФ до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. // URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents>.
2. Стратегическое направление в области цифровой трансформации транспортной отрасли РФ до 2030 года // URL: <http://government.ru/docs/all/150354/>
3. Государственная программа «Развитие транспортной системы» // URL: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/gosudarstvennye-programmy/1089>
4. Доклад о реализации Транспортной стратегии на период до 2030 г. // URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/11/12749?type=11>
5. Национальная цифровая транспортно-логистическая платформа // URL: [https://www.tadviser.ru/images/a/a0/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%88%D0%BE%D1%82\\_20-12-2023\\_155931.jpg](https://www.tadviser.ru/images/a/a0/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%88%D0%BE%D1%82_20-12-2023_155931.jpg)
6. Эксперты оценили анонсированную Мишустиним новую модель госуправления // URL: <https://www.vedomosti.ru/politics/articles/2023/04/26/972717-eksperti-otsenili-mishustinim-model-gosupravleniya>
7. Бурков В.Н. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев, В.В. Цыганов, А.М. Черкашин. – М.: Наука, 1984. – 271 с.
8. Цыганов В.В. Адаптивные механизмы в отраслевом управлении. – М.: Наука, 1991. – 166 с.
9. Цыганов В.В. Интеллектуальное предприятие. Теория и практика управления эволюцией организации / В.В. Цыганов, В.А. Бородин, Г.Б. Шишкин – М.: Университетская книга, 2004. – 768 с.
10. Цыганов В.В. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза / В.В. Цыганов, И.Г. Малыгин, А.К. Еналеев и др. – СПб.: ИПТ РАН, 2016. – 216 с.
11. Макоско А.А. Стратегическое планирование устойчивого функционирования экономического комплекса РФ. Угрозы, целеполагание, прогноз, рекомендации / А.А. Макоско, А.В. Матешева, В.В. Цыганов и др. – М.: Наука, 2021. – 412 с.
12. Малыгин И.Г. Комплекс моделей стратегического управления транспортной инфраструктурой Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики / И.Г. Малыгин, А.К. Еналеев, В.В. Цыганов и др. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. – 122 с.
13. Recht B. Reflections on the learning-to-control renaissance // Proc. of the 21-st World Congress IFAC. – Berlin, 2020. – P. 4707.
14. Косяков А. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит, С. Сеймур и др. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
15. Цыганов В.В., Роцин А.А. Самообучение ранжированию предприятия железнодорожного транспорта по энергоэффективности // Вестник Уральского гос. университета путей сообщения. 2020. № 3. – С. 69–80.

**СЕКЦИЯ 2.**

**Модели и механизмы ТАС**

# УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЯГКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПРОЕКТАМИ В УПРАВЛЕНИИ ПРОГРАММАМИ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

**Бурков В.Н., Буркова И.В., Щепкин А.В.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
Vlab17@bk.ru, irbur27@gmail.com, av\_shch@mail.ru

*Аннотация. Рассматриваются задачи управления программами при наличии стохастической зависимости реализации мягких зависимостей между проектами. Как правило, использование мягких зависимостей позволяет уменьшить время или затраты на выполнение непосредственно следующего проекта, что приводит к уменьшению времени выполнения всей программы или затрат на ее выполнение. Получение эффекта от учета мягких зависимостей зависит от вероятности их реализации.*

*Ключевые слова: программа, проект, жесткие зависимости, мягкие зависимости, стохастическая неопределенность реализации мягких зависимостей.*

## **Введение**

При реализации программ часто возникает ситуация, когда результаты одного проекта с определенной вероятностью могут быть использованы при выполнении других проектов, что приводит к сокращению времени выполнения или затрат на выполнение (или и то и другое) других проектов.

Задачи с мягкими зависимостями рассматривались в [1-3]. Однако в работах [1,2] эффект от учета нескольких мягких зависимостей на проект (и по времени, и по затратам) равнялся сумме эффектов от влияния отдельных зависимостей и во всех этих работах не учитывалась вероятность реализации мягких зависимостей или вероятность сокращения времени или затрат при реализации мягких зависимостей

## **1. Постановка задачи**

В [3] приведены основные определения.

**Определение 1.** Мягкие (рекомендательные) зависимости  $(i, j)$  – зависимости, которые можно не выполнять, но реализация которых уменьшает время выполнения или затраты на выполнение (или то и другое) проекта  $j$ .

В [3] также введены следующие обозначения:  $Q_j$  – множество мягких зависимостей, заходящих в вершину  $j$ .  $R_j$  – подмножество реализуемых мягких зависимостей,  $A_j(R_j)$  – уменьшение времени

выполнения проекта,  $\tau_j$  – продолжительность проекта, если мягкие зависимости не учитываются. Заметим, что  $A_j(R_j) < \tau_j$ , так как продолжительность проекта всегда больше нуля.

**Определение 2.** Жесткие зависимости – это классические зависимости типа «финиш-старт» (работа последующая не может начаться, пока не завершится работа предшествующая).

**Определение 3.** Граф зависимостей – граф, вершины которого соответствуют проектам, а дуги отражают зависимости между проектами – жесткие и мягкие. Граф зависимостей может иметь контуры.

## 2 Определение множества выполняемых мягких зависимостей

### 2.1. Постановка задачи

Задано множество вариантов включения мягких зависимостей в программу. Каждый вариант характеризуется вероятностью реализации и временем выполнения программы.

**Задача.** Определить вариант оптимальный по критериям вероятности и продолжительности программы.

Алгоритм и обоснование алгоритма для решения задачи для графа без контуров по критерию продолжительности программы приведен в [3].

В [3] в качестве примера рассмотрен граф, представленный на рис. 1.

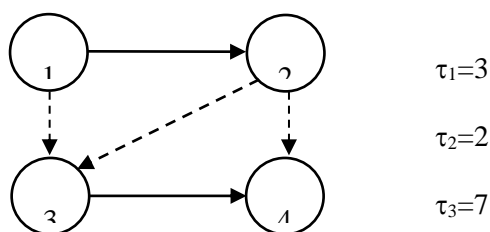


Рис. 1. Граф, для иллюстрации решения задачи на основе предложенного алгоритма.

На этом рисунке пунктирной стрелкой изображены мягкие зависимости. Здесь  $\tau_i$  – время выполнения проекта, если мягкие зависимости не учитываются, а  $m$  – количество проектов в программе, соответственно время выполнения всей программы в случае, когда мягкие зависимости не учитываются определяется как  $T = \sum_{i=1}^m \tau_i$ . В [3] также показано, что минимальная продолжительность программы с учетом мягких зависимостей равна 7. Причем это значение получено без учета вероятностей реализации мягких зависимостей.

### 3. Учет вероятности реализации мягких зависимостей

Пусть в программе всего  $n$  мягких зависимостей,  $p_i, i=1,2,\dots,n$  – вероятность реализации  $i$ -й мягкой зависимости,  $t_i, i=1,2,\dots,n$  – время сокращения проекта при реализации  $i$ -й мягкой зависимости.

Рассмотрим ситуацию, когда все мягкие зависимости реализуются. Для этого случая построим критический путь и для этого критического пути рассчитаем время выполнения программы  $T - U$ , где

$U = \sum_{i=1}^n t_i$ . Заметим здесь, что сокращение времени выполнения программы на величину  $U$  обеспечивают именно мягкие зависимости. Однако вероятность того, что все мягкие зависимости реализуются, будет

равна  $v = \prod_{i=1}^n p_i$ . Будем считать, что все мягкие зависимости упорядочены по убыванию вероятности реализации, то есть  $p_1 > p_2 > \dots > p_n$ .

Что изменится, если реализуются только  $(n-1)$  мягкие зависимости с номерами  $i=1,2,\dots,n-1$ . Легко посчитать, что в этом случае время выполнения программы будет равно  $T - U + t_n$ , а вероятность

реализации  $(n-1)$ -й мягкой зависимости будет равна  $v_{n-1} = \prod_{i=1}^{n-1} p_i$ . Для сравнения двух этих вариантов



рассчитаем математическое ожидание времени сокращения выполнения работ для каждого варианта. Математическое ожидание при реализации всех мягких зависимостей  $M_n$  определяется как

$$M_n = \sum_{i=1}^n t_i \prod_{i=1}^n p_i \quad (1)$$

Соответственно, математическое ожидание при реализации  $(n-1)$ -й мягкой зависимости  $M_{n-1}$  определяется как

$$M_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} t_i \prod_{i=1}^{n-1} p_i$$

Определим, когда  $M_{n-1} > M_n$ , или когда выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^{n-1} t_i \prod_{i=1}^{n-1} p_i > \sum_{i=1}^n t_i \prod_{i=1}^n p_i \quad (2)$$

Неравенство (2) можно переписать в виде

$$p_n < 1 - \frac{t_n}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (3)$$

Отсюда следует, если для вероятности  $p_n$  справедливо неравенство (3), то отказ от реализации  $n$ -й мягкой зависимости приводит к тому, что математическое ожидание реализации всех  $n$  мягких зависимостей оказывается меньше, чем математическое ожидание реализации  $(n-1)$  мягких зависимостей.

Аналогичные рассуждения можно провести и при отказе от реализации группы мягких зависимостей. Действительно, пусть  $Q$  – множество мягких зависимостей, которые не реализуются. Тогда математическое ожидание при реализации мягких зависимостей, не входящих в множество  $Q$  определяется как

$$M_{-Q} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \notin Q}}^n t_i \frac{\prod_{i=1}^n p_i}{\prod_{i \in Q} p_i}$$

И даже в этом случае возможна ситуация, когда  $M_{-Q} > M_n$ . Действительно, из неравенства (4)

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \notin Q}}^n t_i \frac{\prod_{i=1}^n p_i}{\prod_{i \in Q} p_i} > \sum_{i=1}^n t_i \prod_{i=1}^n p_i \quad (4)$$

Получаем

$$\prod_{i \in Q} p_i < \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \notin Q}}^n t_i} \quad (5)$$

Таким образом, если для вероятности реализации мягких зависимостей, входящих в множество  $Q$  справедливо неравенство (5), то отказ от реализации  $i$  мягких зависимостей  $i \in Q$  приводит к тому, что математическое ожидание реализации всех  $n$  мягких зависимостей оказывается меньше чем математическое ожидание реализации без мягких зависимостей из множества  $Q$ .

Отсюда следует вывод, чтобы определить максимальное значение математического ожидания необходимо рассмотреть все возможные варианты формирования множества  $Q$ . Нетрудно видеть, что общее количество элементов множества  $Q$  равно  $\sum_{i=1}^n C_n^i$ .

**Пример 1.** Пусть в программе имеются пять мягких зависимостей. Время сокращения выполнения программы и вероятность реализации мягких зависимостей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Время сокращения программы и вероятность реализации мягких зависимостей

№ мягкой зависимости	1	2	3	4	5
Время сокращения выполнения программы	12	8	4	2	1

Вероятность реализации	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
------------------------	-----	------	-----	------	-----

В соответствии с (1), математическое ожидание всех мягких зависимостей равно  $M_n=8,675$ .

Рассчитаем математические ожидания при реализации четырех мягких зависимостей. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Математическое ожидание времени сокращения программы при реализации четырех мягких зависимостей

№ мягкой зависимости	1	2	3	4	5	$M_4$
выбор	-	+	+	+	+	6,885
выбор	+	-	+	+	+	8,14
выбор	+	+	-	+	+	9,237
выбор	+	+	+	-	+	9,45
выбор	+	+	+	+	-	9,282

В таблицах 2,3,4,5 реализованные мягкие зависимости обозначены знаком (+), не реализованные знаком (-).

Рассчитаем математические ожидания при реализации трех мягких зависимостей. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Математическое ожидание времени сокращения программы при реализации трех мягких зависимостей

№ мягкой зависимости	1	2	3	4	5	$M_3$
выбор	-	-	+	+	+	4,284
выбор	-	+	-	+	+	6,311
выбор	-	+	+	-	+	7,02
выбор	-	+	+	+	-	7,14
выбор	+	-	-	+	+	8,033
выбор	+	-	+	-	+	8,568
выбор	+	-	+	+	-	8,568
выбор	+	+	-	-	+	9,923
выбор	+	+	-	+	-	9,818
выбор	+	+	+	-	-	10,08

Рассчитаем математические ожидания при реализации двух мягких зависимостей. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Математическое ожидание времени сокращения программы при реализации двух мягких зависимостей

№ мягкой зависимости	1	2	3	4	5	$M_2$
выбор	-	-	-	+	+	2,295
выбор	-	-	+	-	+	3,6
выбор	-	+	-	-	+	6,075
выбор	+	-	-	-	+	8,19
выбор	-	-	+	+	-	4,08
выбор	-	+	-	+	-	6,375
выбор	+	-	-	+	-	8,33
выбор	-	+	+	-	-	7,2
выбор	+	-	+	-	-	8,96
выбор	+	+	-	-	-	10,5

Рассчитаем математические ожидания при реализации одной мягкой зависимости. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Математическое ожидание времени сокращения программы при реализации одной мягкой зависимости

№ мягкой зависимости	1	2	3	4	5	$M_1$
выбор	+	-	-	-	-	8,4
выбор	-	+	-	-	-	6
выбор	-	-	+	-	-	3,2
выбор	-	-	-	+	-	1,7
выбор	-	-	-	-	+	0,9

Сравнивая полученные значения математических ожиданий времени сокращения программы можем утверждать, что максимальное значение математического ожидания равно 10,5 достигается при реализации двух мягких зависимостей N 1 и N 2.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда все мягкие зависимости обеспечивают одинаковое время сокращения проектов и при этом вероятность реализации у них тоже одинаковая.

В этом случае математическое ожидание реализации всех мягких зависимостей может быть записано в виде

$$M_n = ntp^n \quad (6)$$

Предполагая, что реализуются только k мягких зависимостей, выражение (6) может быть записано в виде

$$M_k = ktp^k$$

Определим количество мягких зависимостей, реализация которых позволяет получить максимальное значение математического ожидания времени сокращения программы

$$\frac{d(ktp^k)}{dk} = tp^k + ktp^k \ln p = 0 \quad (7)$$

Из (7) получаем

$$k = -\frac{1}{\ln p} = \frac{1}{\ln \frac{1}{p}} \quad (8)$$

Так как рассматривается случай  $k < n$ , то из (8) следует

$$p < e^{-1/n} \quad (9)$$

Пример 2. Как и в примере 1 имеются пять мягких зависимостей. Время сокращения выполнения программы каждой мягкой зависимостью  $t=10$ . Из (9) следует, что  $p < 0,819$ . Поэтому рассмотрим ситуацию, когда, вероятность реализации  $p=0,7$ .

В соответствии с (6), математическое ожидание реализации всех мягких зависимостей равно  $M_5=8,404$ .

Для заданных в примере вероятностей из (8) получаем  $k=2,8 \approx 3$ . Математические ожидания при реализации разного числа мягких зависимостей приведены в таблице 6.

Таблица 6. Математические ожидания времени сокращения программы при реализации различного числа мягких зависимостей

№ мягкой зависимости	1	2	3	4	5	$M_i$
выбор	+	+	+	+	+	8,404
выбор	+	+	+	+	-	9,604
выбор	+	+	+	-	-	10,29
выбор	+	+	-	-	-	9,8
выбор	+	-	-	-	-	7

В таблице 6, как и в примере 1 реализованные мягкие зависимости обозначены знаком (+), не реализованные знаком (-).

Из таблицы 6 видно, что максимальное значение математического ожидания времени сокращения программы достигается при реализации трех мягких зависимостей, что соответствует расчету по выражению (8).

#### 4. Заключение

В работе рассмотрена задача определения максимальных сроков сокращения продолжительности программы, при наличии мягких зависимостей между проектами и вероятностью реализации мягких зависимостей. Показано, что в случае, когда все мягкие зависимости обеспечивают одинаковое время сокращения проектов и при этом вероятность реализации у них тоже одинаковая, реализация всех мягких зависимостей обеспечивает максимальное значение математического ожидания времени сокращения программы только тогда, когда ограничение (9) на вероятность реализации не выполняется.

#### Литература

1. Баркалов С.А. Математические основы управления проектами: Учебн. пособие / Баркалов С.А., Бурков В.Н., Буркова И.В., Воропаев В.И., Секлетова Г.И. и др. Под ред. Буркова В.Н. – М.: Высш. шк., 2005. – 423 с.
2. Баркалов С.А., Модели и методы распределения ресурсов в управлении проектами / Баркалов С.А., Буркова И.В., Колпачев В.Н., Потапенко А.М. М.: ИПУ РАН, 2004. - 85 с.

3. *Бурков В.Н., Буркова И.В., Щепкин А.В.* Мягкие зависимости между проектами в управлении программами / Труды 16-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2023, Москва). М.: ИПУ РАН, 2023. С. 149-155.

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ НА ОСНОВЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАНЖИРОВАНИЯ

Бурков В.Н., Заложнев А.Ю.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
vlab17@bk.ru, zalozhnev@yandex.ru

*Аннотация.* Статья посвящена решению задачи выбора оптимального варианта стабилизационной экономической стратегии на основе макроэкономического моделирования и многокритериального ранжирования.

*Ключевые слова:* задача выбора, оптимальный вариант, стабилизационная экономическая стратегия, макроэкономическое моделирование, нелинейные дифференциальные уравнения, начальные условия, экономические показатели, многокритериальное ранжирование, канонический ранг, неканонический ранг, тензорная свертка.

## Введение

В работе [1] предложена макроэкономическая модель  $M$ , позволяющая исследовать процессы стабилизации потребительского рынка. Математическая модель представляет собой систему обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая движение макроэкономической системы из заданного исходного состояния (начальных условий) к положению равновесия, которое определяется структурой и параметрами модели.

С использованием этой модели может быть решена задача выбора оптимального варианта  $A^*$  экономической стратегии (экономической политики), направленной на стабилизацию потребительского рынка, из некоторой совокупности допустимых вариантов  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ , которую позволяет исследовать модель  $M$ . Каждый из вариантов  $A_i$  определенным образом задает структуру и значения параметров модели.

## 1. Постановка задачи

В качестве оптимального варианта экономической политики выберем вариант  $A^*$ , удовлетворяет соотношению (1):

$$A^* = \underset{A_i, i=1, n}{\operatorname{argmax}} (\sum_{j=1}^m \beta_j R_j(A_i)), \sum_{j=1}^m \beta_j = b, \quad (1)$$

где  $R_j(A_i)$  – ранг  $i$ -го варианта экономической стратегии по  $j$ -му критерию,  $m$  – число рассматриваемых критериев,  $\beta_j$  – весовой коэффициент, задающий значимость  $j$ -ого экономического критерия,  $b$  – заданная константа.

## 2. Решение задачи выбора оптимального варианта стабилизационной экономической стратегии на основе макроэкономического моделирования и многокритериального ранжирования

Под рангом  $R_{ji} = R_j(A_i)$  понимается число  $l$ , которое характеризует место  $i$ -го варианта экономической политики (исходная нумерация вариантов произвольная:  $i=1, n$ ) в последовательности достигнутых значений экономических показателей  $U_j: U_j^1, \dots, U_j^n$  для  $j$ -ого экономического критерия, такое, что имеет место соотношение (2)

$$U_j^{l-1} < U_j^l < U_j^{l+1}, \quad (2)$$

если большее значение  $j$ -ого критерия отрицательно характеризует изменение экономической ситуации, или соотношение (3)

$$U_j^{l-1} > U_j^l > U_j^{l+1}, \quad (3)$$

если большее значение  $j$ -ого критерия положительно характеризует изменение экономической ситуации.

Несколько ( $K$ ) вариантов могут иметь одинаковые ранги  $\overline{R}_{jk}$  по  $j$ -му критерию, если  $\forall k \in [2, \dots, K]$  справедливо соотношение (4):

$$\left| \frac{U_j^k - U_j^1}{U_j^1} \right| \leq \Delta, \quad (4)$$

где  $U_j^1$  – минимальное или максимальное значение критерия в рассматриваемой группе из  $K$  вариантов.

Усредненные ранги  $\overline{R}_{jk}$  одинаковые для всей группы из  $K$  вариантов могут быть определены как среднее арифметическое исходных рангов  $R_{jk}$ ,  $k = 1, K$ :

$$\overline{R}_{jk} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K R_{ji}, \quad k = 1, K. \quad (5)$$

Ранги  $\overline{R}_{jk}$  могут и не быть целыми числами, тогда  $\forall k \in [2, \dots, K]: \overline{R}_{jk} \neq R_{jk}$ .

В данном случае рассматриваются, т.н. канонические ранги. Отметим, что при выборе оптимальной экономической стратегии могут использоваться и неканонические ранги, когда всей группе значений критерия из  $K$  вариантов присваивается ранг  $R_{ji+1} = R_{ji} + 1$ , где  $R_{ji}$  – предыдущее достигнутое значение ранга для упорядоченной последовательности значений показателя для заданного набора вариантов экономической стратегии.

В качестве значений  $U_j^i$  могут быть выбраны либо равновесные (значения на конец рассматриваемого периода), либо экстремальные (минимальные или максимальные) значения экономических показателей  $X_j$ , полученные на модели  $M$  в зависимости от выбранного варианта стабилизационной стратегии  $A_i$ , который определенным образом задает структуру и значения параметров модели:

$$U_j^i = X_j(A_i, T) \quad (6)$$

либо

$$U_j^i = \max_{t \in [0, T]} X_j(A_i, t), \quad (7)$$

если предполагается, что большие значения  $X_j$  отрицательно характеризуют выбранную экономическую стратегию, или

$$U_j^i = \min_{t \in [0, T]} X_j(A_i, t), \quad (8)$$

в противном случае.

В качестве  $X_j$  следует выбирать экономические показатели, вычисляемые на модели  $M$  и позволяющие учитывать последствия реализации стабилизационной политики, такие как индексы цен, занятости, производства.

Для удобства оцениваемые равновесные и экстремальные (отдельно) показатели по каждому варианту стабилизационной стратегии могут быть сведены в таблицу:

Таблица 1. Значения экономических показателей для вариантов стабилизационной стратегии

Экономические показатели	Варианты стабилизационной экономической стратегии				
	$A_1$		$A_i$		$A_n$
			$U_j^i$		

где по горизонтали (по столбцам) расположены варианты стабилизационной политики, а по вертикали (по строкам) – оцениваемые критерии, задаваемые в таблице в абсолютных или относительных величинах (%).

Для вычисления подкритериальных функций в (1) ранги экономических показателей для различных вариантов стабилизационной политики могут быть также сведены в аналогичную таблицу 2, в которой вместо значений критериев указаны их ранги. При необходимости в соответствующей клетке в знаменателе указывается вычисленное в соответствии с (5) среднее значение ранга соответствующего критерия.

Таблица 2. Ранги экономических показателей для различных вариантов стабилизационной политики

Экономические показатели	Ранги вариантов стабилизационной экономической стратегии				
	$A_1$		$A_i$		$A_n$
			$R_{ji} / \overline{R_{ji}}$		

Отметим, что функции в (1) фактически являются тензорными свертками [[https://en.wikipedia.org/wiki/Tensor\\_contraction](https://en.wikipedia.org/wiki/Tensor_contraction)] над полем размерности 1 соответствующих столбцов таблицы (матрицы) 2. При этом вычисленные значения функции (1) для каждого варианта стабилизационной экономической стратегии могут быть свернуты в таблицу 3, в которой столбцам соответствуют вариантам стабилизационной политики  $A_i$ , а в 2-х строках по горизонтали указаны соответственно значения тензорных свертков (1), вычисленные согласно правилу (6) или правилам (7)-(8). В таблице 3 эти свертки обозначены как экономические критерии: равновесный и экстремальный, соответственно.

Таблица 3. Ранги экономических показателей для равновесного и экстремального экономического критерия

Экономические критерии	Варианты стабилизационной экономической стратегии				
	$A_1$		$A_i$		$A_n$

Равновесный			$\sum_{j=1}^m \beta_j R_{ji}^s(A_i)$		
Экстремальный			$\sum_{j=1}^m \beta_j R_{ji}^{ext}(A_i)$		

В таблице 3 переменными  $R_{ji}^s$  и  $R_{ji}^{ext}$  обозначены свертки рангов (равновесных –  $s$  и экстремальных –  $ext$ ) экономических показателей ( $U_j^i$ ) для соответствующего варианта стабилизационной экономической стратегии ( $A_i$ ).

Отметим также, что поскольку выбор оптимального варианта стабилизационной экономической стратегии производится на макроэкономической модели  $M$ , которая представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, то переходные процессы в ней зависят и от выбора начальных условий. Поэтому для оценивания социальных и экономических последствий переходных процессов в зависимости от выбранного варианта экономической стратегии в случае, когда модель еще не полностью идентифицирована, может производиться осреднение ранга варианта стабилизационной стратегии по  $L$  наборам начальных условий:

$$\overline{R_j(A_i)} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L R_j^l(A_i), \quad (9)$$

где  $R_j^l(A_i)$  – ранг  $i$ -го варианта экономической стратегии по  $j$ -му критерию для  $l$ -го набора начальных условий.

### 3. Заключение

Отметим, что поскольку оптимальные варианты стабилизационной экономической стратегии, выбранные на основе правила (6) или правил (7)-(8), могут не совпадать, то для выбора единственной оптимальной экономической стратегии может потребоваться дополнительный анализ результатов моделирования и дополнительное экспертное оценивание вариантов и критериев оценки вариантов стабилизационной политики. Например, может потребоваться экспертное оценивание коэффициента  $0 < \lambda < 1$ , который определяет относительную значимость равновесного и экстремального экономического критерия.

На основе знания оценки значения  $\lambda$  математический критерий (1) выбора оптимального варианта экономической политики  $A^*$  может быть преобразован и представлен в виде (10):

$$A^* = \underset{A_i, i=1, n}{argmax} (\lambda \sum_{j=1}^m \beta_j R_{ji}^s(A_i) + (1 - \lambda) \sum_{j=1}^m \beta_j R_{ji}^{ext}(A_i)), \sum_{j=1}^m \beta_j = b, 0 < \lambda < 1. \quad (10)$$

При этом предполагается, что весовые коэффициенты  $\beta_j$ , задающие значимость экономических показателей, в данном случае одинаковы для равновесного и экстремального экономических критериев. Возможное усреднение рангов в соответствии с (5) и табл. 2 во избежание громоздкости в (9) не показано.

В заключение также отметим, что при написании данной статьи мы отталкивались от макроэкономической модели, описанной в работе [1], а также ориентировались на подходы к решению проблемы комплексного многокритериального оценивания, предложенные в работах [2-6].

### Литература

1. *Burkov V.N., Kostyreva A.D., Zalozhnev A.Yu.* Consumer Market Stabilization Modeling // Proc. of the 2022 15-th International Conference "Management of large-scale system development (MLSD)". – Moscow, P. 1-5.
2. *Бурков В.Н., Кондратьев В.В., Константинова Н.В., Юхновец В.П.* Методы описания показателей оценки деятельности и систем стимулирования на предприятиях // Обмен опытом в радиопромышленности. 1981. N 10.
3. *Бурков В.Н., Гореликов Н.И., Черкашин А.М.* Методические основы комплексной оценки результатов деятельности предприятий с учетом их прогрессивности в Союзэлектроприборе // Приборы и системы управления. 1982. N 11. – С. 40-42.
4. *Бурков В.Н., Заложнев А.Ю.* Макроэкономическое моделирование процесса стабилизации потребительского рынка. – М.: ИПУ РАН, 1992. – 83 с.
5. *Бурков В.Н., Коргин Н.А., Сергеев В.А.* Идентификация механизмов комплексного оценивания на основе унитарного кода // Управление большими системами: сборник трудов. 2020. N 87. С. 67-85.
6. *Burkov V.N., Korgin N.A., Sergeev V.A.*, Identification of Integrated Rating Mechanisms as Optimization Problem // Proc. of the 2020 13-th International Conference "Management of large-scale system development (MLSD)". – Moscow, P. 1-5.

# МНОГОШАГОВАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ИГРА НА ПОДДЕРЖАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ

Горелов М.А.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской Академии наук, Москва, Россия  
griever@ccas.ru

*Аннотация.* Рассматривается многошаговая иерархическая игра двух лиц с правом первого хода у одного из игроков. Предполагается, что игроки стремятся максимизировать минимум по времени своих мгновенных выигрышей. Ищется максимальный гарантированный результат игрока, обладающего правом первого хода на классе позиционных стратегий. Задача сводится к вычислению кратных максиминов на конечномерных пространствах.

*Ключевые слова:* многошаговые игры, максимальный гарантированный результат, принцип динамического программирования.

## Введение

Исследование динамических игр с иерархической структурой было начато в конце семидесятых годов XX века. Но в настоящее время они изучены гораздо хуже их статических аналогов, хотя понятно, что большинство исследуемых процессов носят ярко выраженный динамический характер. Разумеется, в некоторых случаях исследовать эффекты, связанные с динамикой моделируемого процесса и, скажем, с имеющейся неопределенностью, можно независимо. И в таких случаях рассмотрение более простых статических моделей вполне оправдано. Но есть и случаи, когда появляются своего рода синергетические эффекты. Поэтому изучение динамических игр представляется весьма актуальной, хотя и непростой задачей.

Нередки случаи, когда участники конфликта в каждый момент времени что-то «получают от жизни». И хотелось бы, чтобы в каждый момент «удовлетворение» от этого было побольше. Таким образом, появляется своеобразная многокритериальная задача. А в таком случае необходим выбор некой свертки критериев. Исследование динамических иерархических моделей началось с рассмотрения игр с терминальными критериями [1–2]. Позднее были исследованы более сложные игры с интегральными критериями [3]. В данной статье вместо линейной используется свертка «минимум». Такая свертка отражает поведение игроков, которые не хотят, чтобы их «уровень жизни» был слишком мал в «трудные времена» и готовы ради этого даже пожертвовать каким-то выигрышем в «тучные годы».

В более ранних работах использован один метод исследования. Он основан на «угадывании» структуры оптимальных стратегий и дальнейшем уточнении их параметров. В данном докладе применяется альтернативный подход, более близкий к классической идее динамического программирования.

Отметим, что в данном докладе рассматривается игра с априорным сообщением информации, т.е. Центр сообщает игроку нижнего уровня свою стратегию на все дальнейшие шаги. Такая задача не является совершенной по подыграм. Поэтому применение метода динамического программирования «напрямую» невозможно. Тем не менее, достаточно простой, и эффективный способ решения задачи удается предложить.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим динамическую управляемую систему, описываемую соотношениями

$$x_{t+1} = f_t(x_t, u_t, v_t), t = 0, 1, \dots, T, \quad (1)$$

$$u_t \in U_t, v_t \in V_t, t = 0, 1, \dots, T, \quad (2)$$

$$g(u, v) = \min \left\{ \min_{t=0, \dots, T} g_t(x_t, u_t, v_t), G_{T+1}(x_{T+1}) \right\}, \quad (3)$$

$$h(u, v) = \min \left\{ \min_{t=0, \dots, T} h_t(x_t, u_t, v_t), H_{T+1}(x_{T+1}) \right\}.$$

Здесь точка  $x_t \in X_t$  описывает фазовое состояние системы в момент времени  $t$ . Фазовое пространство  $X_t$  будем считать наделенным топологией и компактным. Начальное состояние  $x_0$  системы считаем параметром задачи. Элементы  $u_t \in U_t$  и  $v_t \in V_t$  – это управления, выбираемые в момент времени  $t$ . Множества управлений  $U_t$  и  $V_t$  будем считать компактными топологическими пространствами. Функции  $f_t: X_t \times U_t \times V_t \rightarrow X_{t+1}$  предполагаются непрерывными. Будем считать, что управление системой осуществляют два игрока: первый из них выбирает управления  $u_t \in U_t$ , а второй – управления  $v_t \in V_t$ . Для краткости обозначим,  $u = (u_0, u_1, \dots, u_t), v = (v_0, v_1, \dots, v_t), U = \prod_{t=0}^T U_t, V = \prod_{t=0}^T V_t$ . Будем считать, что первый игрок стремится максимизировать значение функции  $g(u, v)$ , а второй – значение



функции  $h(u, v)$ . Функции  $g_t: X_t \times U_t \times V_t \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $h_t: X_t \times U_t \times V_t \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $G_{T+1}: X_{T+1} \rightarrow \mathbb{R}$  и  $H_{T+1}: X_{T+1} \rightarrow \mathbb{R}$  предполагаем непрерывными.

**Замечание 1.** При выполнении остальных предположений, условие компактности пространства  $X_t$  становится несущественным. Во многих случаях удобно считать, что  $X_t$  – это конечномерное евклидово пространство. Здесь это предположение делается только для краткости. В противном случае пришлось бы в некоторых местах оговариваться, что речь идет о компактном множестве «достижимых» точек фазового пространства.

Введенные обозначения позволяют естественным образом сопоставить динамической игре (1)–(3) игру в нормальной форме  $\Gamma = \langle U, V, g, h \rangle$ . В дальнейшем основной интерес будет представлять информационное расширение этой игры, определяемое следующим образом.

Будем предполагать, что первый игрок, выбирая свое управление в момент времени  $t$ , имеет информацию о текущем значении фазовой переменной  $x_t$  и «накопленных» выигрышах  $y_t = \min_{\tau=0, \dots, t-1} g_\tau(x_\tau, u_\tau, v_\tau)$  и  $z_t = \min_{\tau=0, \dots, t-1} h_\tau(x_\tau, u_\tau, v_\tau)$ . Таким образом, он, по сути, выбирает функцию  $u_{*t}: X_t \times \mathbb{R}^2 \rightarrow U_t$ . Если позиционная стратегия  $u_* = (u_{*0}, u_{*1}, \dots, u_{*T})$  первого игрока и программная стратегия  $v = (v_0, v_1, \dots, v_T)$  второго игрока зафиксированы, то система (1)–(3) дополненная уравнениями

$$u_t = u_{*t}(x_t, y_t, z_t), y_{t+1} = \min\{y_t, g_t(x_t, u_t, v_t)\}, z_{t+1} = \min\{z_t, h_t(x_t, u_t, v_t)\}, \quad (4)$$

позволяет последовательно вычислить управления и фазовые точки  $u_0, y_1, z_1, x_1, u_1, \dots, x_T, u_T, a$ , значит, и выигрыши.

$$g_*(u_*, v_*) = g(u, v), h_*(u_*, v_*) = h(u, v), \quad (5)$$

Здесь для единообразия приняты следующие обозначения.  $u_* = (u_{*0}, u_{*1}, \dots, u_{*T})$ ,  $v_* = v$ . Пусть  $U_{t*}, t = 0, 1, \dots, T$  – множество всех функций из  $X_t$  в  $U_t$ ,  $U_* = \prod_{t=0}^T U_{t*}$ ,  $V_* = V$ . Тогда условия (1)–(5) корректно определяют функции  $g_*: U_* \times V_* \rightarrow \mathbb{R}$  и  $h_*: U_* \times V_* \rightarrow \mathbb{R}$ . тем самым определена игра в нормальной форме  $\Gamma_* = \langle U_*, V_*, g_*, h_* \rangle$ .

Будем предполагать, что игрок 1 обладает правом первого хода. Тогда для всякой игры в нормальной форме может быть следующим образом определен его максимальный гарантированный результат.

**Определение.** Число  $\gamma$  называется гарантированным результатом первого игрока в игре  $\Gamma = \langle U, V, g, h \rangle$  тогда и только тогда, когда существуют стратегия  $u \in U$  и число  $\lambda \in \mathbb{R}$ , для которых выполняются следующие два условия:

1. существует такая стратегия  $w \in V$ , что  $h(u, v) \geq \lambda$ ;
2. для любой стратегии  $v \in V$  выполняется хотя бы одно из двух неравенств  $g(u, v) > \gamma$  или  $h(u, v) < \lambda$ .

Точная верхняя грань  $R(\Gamma)$  всех гарантированных результатов называется максимальным гарантированным результатом первого игрока в игре  $\Gamma$ .

Про стратегию  $u$  будем говорить, что она гарантирует получение результата  $\gamma$ .

**Замечание 2.** При сделанных предположениях в игре  $\Gamma_*$  второй игрок выбирает свою стратегию, уже зная стратегию  $u_*$  своего партнера. Таким образом, он решает обычную задачу оптимального управления (с дискретным временем). А тогда не имеет значения, выбирает ли он программную стратегию, как в рассматриваемой задаче, или позиционную стратегию, аналогичную стратегии первого игрока. Это утверждение доказывается совсем несложно. Но, чтобы избежать этого, с самого начала рассматривается игра с асимметричной информированностью игроков.

## 2. Вычисление максимального гарантированного результата

Исходная игра  $\Gamma$  плохо поддается исследованию. Разумеется, можно использовать метод динамического программирования для того, чтобы при фиксированной стратегии первого игрока найти результат, получение которого гарантирует эта стратегия. Но вот упростить решение самой интересной задачи поиска оптимальной стратегии первого игрока в общем случае, видимо, невозможно. Информационное расширение  $\Gamma_*$  обладает некой дополнительной структурой, которая позволяет упростить эту задачу. Покажем это.

Пусть  $\gamma$  – гарантированный результат в игре  $\Gamma_*$ ,  $u_*$  – какая-то из гарантирующих получение этого результата стратегий,  $\lambda$  и  $w_* = (w_1, w_2, \dots, w_T)$  – соответствующие число и стратегия второго игрока, существование которых предусмотрено определением, а пара стратегий  $u_*$  и  $w_*$  порождают в силу

уравнений (1),(2) и (4) траекторию  $(x_1^0, y_1^0, z_1^0), (x_2^0, y_2^0, z_2^0), \dots, (x_T^0, y_T^0, z_T^0), (x_{T+1}^0, y_{T+1}^0, z_{T+1}^0)$  в расширенном фазовом пространстве.

Пусть пара стратегий  $u_*$  и  $v_*$  порождает траекторию  $u_*$  и  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_T, y_T, z_T), (x_{T+1}, y_{T+1}, z_{T+1})$ . Возможны четыре случая.

1)  $z_T < \lambda$  и  $y_T \leq \gamma$ . В этом случае заведомо  $h_*(u_*, v_*) < \lambda$  и второй пункт определения выполняется независимо от выбора функции  $u_{*T}$ .

2)  $z_T < \lambda$  и  $y_T > \gamma$ . Этот случай аналогичен предыдущему.

3)  $z_T \geq \lambda$  и  $y_T \leq \gamma$ . В этом случае выполняется неравенство  $g_*(u_*, v_*) \leq \gamma$  и потому неравенство  $\min\{h_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T), H_{T+1}(f_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T))\} < \lambda$  должно выполняться для всех  $v_T \in V_T$ . Следовательно,

$$\max_{v_T \in V_T} \min\{h_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T), H_{T+1}(f_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T))\} < \lambda,$$

и тем более

$$H_T(x_T) = \min_{u_T \in U_T} \max_{v_T \in V_T} \min\{h_T(x_T, u_T, v_T), H_{T+1}(f_T(x_T, u_T, v_T))\} < \lambda.$$

4)  $z_T \geq \lambda$  и  $y_T > \gamma$ . Здесь возможны два подслучая.

а)  $\min_{v_T \in B_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T))} \min\{g_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T), G_{T+1}(f_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T))\} \leq \gamma$ , где использовано обозначение  $B_T(x_T, u_T) = \{v_T \in V_T: \min[h_T(x_T, u_T, v_T), H_{T+1}(f_T(x_T, u_T, v_T))] \geq \lambda\}$ . Тогда должно выполняться неравенство  $H_T(x_T) < \lambda$ .

б)  $\min_{v_T \in B_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T))} \min\{g_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T), G_{T+1}(f_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T), v_T))\} > \gamma$ . Тогда тем более

$$G_T(x_T) = \sup_{u_T \in U_T} \min_{v_T \in B_T(x_T, u_T)} \min\{g_T(x_T, u_T, v_T), G_{T+1}(f_T(x_T, u_T, v_T))\} > \gamma.$$

В точке  $(x_{T+1}^0, y_{T+1}^0, z_{T+1}^0)$ , разумеется, имеет место подслучай б) случая 4).

Рассмотрим игру  $\tilde{\Gamma}$

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= f_t(x_t, u_t, v_t), t = 0, 1, \dots, T-1, \\ u_t &\in U_t, v_t \in V_t, t = 0, 1, \dots, T-1, \\ g(u, v) &= \min\left\{\min_{t=0, \dots, T-1} g_t(x_t, u_t, v_t), G_T(x_{T+1})\right\}, \\ h(u, v) &= \min\left\{\min_{t=0, \dots, T-1} h_t(x_t, u_t, v_t), H_T(x_{T+1})\right\}, \end{aligned}$$

и ее информационное расширение  $\tilde{\Gamma}_*$ , построенное по аналогии с игрой  $\Gamma_*$ . Из сказанного выше следует, что для стратегии  $(u_{*0}, u_{*1}, \dots, u_{*T-1})$  первого игрока в игре  $\tilde{\Gamma}_*$ , числа  $\lambda$  и стратегии второго игрока  $w_* = (w_1, w_2, \dots, w_{T-1})$  выполняются все условия определения, то есть  $\gamma$  является гарантированным результатом в игре  $\tilde{\Gamma}_*$ .

Верно и обратное. Определим функции  $u_a, u_p$  и  $u_{*T}$ , отображающие  $X_T \times \mathbb{R}^2$  в  $U_T$  так, что

$$\begin{aligned} \min_{v_T \in B_T(x_T, u_{*T}(x_T, y_T, z_T))} \min\{g_T(x_T, u_a(x_T, y_T, z_T), v_T), G_{T+1}(f_T(x_T, u_a(x_T, y_T, z_T), v_T))\} &> \gamma, \\ \max_{v_T \in V_T} \min\{h_T(x_T, u_p(x_T, y_T, z_T), v_T), H_{T+1}(f_T(x_T, u_p(x_T, y_T, z_T), v_T))\} &= H_T(x_T), \end{aligned}$$

$$u_{*T}(x_T, y_T, z_T) = \begin{cases} u_a(x_T, y_T, z_T), & \text{если } y_T > \gamma \text{ и } G_T(x_T) > \gamma, \\ u_p(x_T, y_T, z_T) & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Выберем  $w_T$  так, что

$$\begin{aligned} \min\left\{h_T(x_T^0, u_{*T}(x_T^0, y_T^0, z_T^0), w_T), H_{T+1}\left(f_T(x_T^0, u_{*T}(x_T^0, y_T^0, z_T^0), w_T)\right)\right\} &= \\ = \max_{v_T \in V_T} \min\{h_T(x_T^0, u_{*T}(x_T^0, y_T^0, z_T^0), v_T), H_{T+1}(f_T(x_T^0, u_{*T}(x_T^0, y_T^0, z_T^0), v_T))\}. \end{aligned}$$

Тогда если для стратегии  $(u_{*0}, u_{*1}, \dots, u_{*T-1})$  первого игрока, числа  $\lambda$  и стратегии второго игрока  $w_* = (w_1, w_2, \dots, w_{T-1})$  выполняются условия определения, относящегося к игре  $\tilde{\Gamma}_*$ , то для стратегии

$(u_{*0}, u_{*1}, \dots, u_{*T})$  числа  $\lambda$  и стратегии второго игрока  $w_* = (w_1, w_2, \dots, w_T)$  будут выполняться те же условия, но уже в игре  $\Gamma_*$ .

Таким образом, поиск максимального гарантированного результата первого игрока в игре  $\Gamma_*$  сведен к аналогичной задаче для более «короткой» игры  $\tilde{\Gamma}_*$  и вычислению максимумов и минимумов на «конечномерных» пространствах. Те же рассуждения можно повторить.

Определим рекуррентно следующие функции и множества

$$\begin{aligned} H_t(x_t) &= \min_{u_t \in U_t} \max_{v_t \in V_t} \min\{h_t(x_t, u_t, v_t), H_{t+1}(f_t(x_t, u_t, v_t))\}, t = T, T-1, \dots, 0, \\ B_t(x_t, u_t) &= \{v_t \in V_t : \min[h_t(x_t, u_t, v_t), H_{t+1}(f_t(x_t, u_t, v_t))] \geq \lambda\}, t = T, T-1, \dots, 0, \\ G_t(x_t) &= \sup_{u_t \in U_t} \min_{v_t \in B_t(x_t, u_t)} \min\{g_t(x_t, u_t, v_t), G_{t+1}(f_t(x_t, u_t, v_t))\}, t = T, T-1, \dots, 0. \end{aligned}$$

Это не отражено в обозначениях, но как видно из определения, величина  $G_0(x_0)$  зависит от параметра  $\lambda$ . Из приведенных рассуждений вытекает следующее утверждение.

**Теорема.** Число  $\gamma$  является гарантированным результатом в игре  $\Gamma_*$  тогда и только тогда, когда  $\max_{\lambda \in \mathbb{R}} G_0(x_0) > \gamma$ .

По ходу доказательства был приведен и способ построения одной из стратегий  $u_*$ , гарантирующей получение результата  $\gamma$ .

**Замечание 3.** По постановке задачи предполагается, что выбор первого игрока в каждый момент времени зависит от текущего фазового состояния системы и от текущих выигрышей этого игрока и игрока нижнего уровня. Выше, по сути, показано, что среди оптимальных стратегий первого игрока обязательно есть такие, которые не используют информацию о текущем выигрыше противника. Это существенно упрощает содержательную мотивировку рассматриваемой постановки. В данной ситуации трудно представить случай, когда игрок узнает свой выигрыш только в конце игры. Поэтому зависимость действий от текущего выигрыша выглядит весьма естественно. Вероятно, можно получить аналогичные результаты и в случае, когда действия первого игрока зависят только от текущего фазового состояния системы. Но при этом само решение будет выглядеть заметно сложнее и, скорее всего, возникнут дополнительные проблемы с устойчивостью результата по отношению к малым изменениям параметров модели.

**Замечание 4.** В целом структура оптимальных стратегий в рассматриваемой игре напоминает аналогичные структуры в моделях с терминальными и интегральными критериями. Но есть одно отличие. На неформальном уровне это выглядит так. В играх с терминальными и интегральными критериями весь плановый период разбивается на две части. В начале игры первому игроку выгодно «поощрять» партнера в расчете на его лояльность в будущем. А в конце планового периода это становится невыгодным, и оптимальное поведение первого игрока строится без учета интересов противника. Понятно, что в каких-то случаях это верно отражает характер поведения реальных игроков. А в каких-то случаях это является следствием неадекватности постановки задачи, не учитывающее, что по окончании планового периода жизнь не заканчивается. В игре с критериями, рассмотренными выше, первому игроку выгодно поддерживать «ровные» отношения с партнером на протяжении всей игры.

### 3. Заключение

В данном докладе использовано определение максимального гарантированного результата, предложенное в [4]. Можно показать, что оно эквивалентно классическому определению [1–3]. Это означает, что сами максимальные гарантированные результаты в обоих смыслах равны и классы оптимальных стратегий тоже совпадают. Идеи, использованные для аналогичного доказательства в [4], проходят в данном случае с минимальными изменениями. Как оказалось, новое определение весьма удобно для анализа динамических игр.

Можно интерпретировать рассмотренную выше модель следующим образом. Можно считать, что  $1 - g_t(x_t, u_t, v_t)$  и  $1 - h_t(x_t, u_t, v_t)$  – это вероятности разорения игроков в момент времени  $t$ . Тогда вся игра описывает взаимодействие игроков, стремящихся избежать разорения. В этой связи вспоминается один результат И.Г. Поспелова [5]. На неформальном уровне он состоит в следующем. Если экономический агент на рынке хочет избежать разорения, то он должен максимизировать свою прибыль.

Было бы интересно исследовать этот эффект с помощью моделей из рассмотренного в данном докладе класса. Разумеется, оно должны быть более конкретизированы.

## **Литература**

1. *Кононенко А.Ф.* О многошаговых конфликтах с обменом информацией // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1977. Т. 17. N 4. – С. 922–931.
2. *Данильченко Т.Н., Кононенко А.Ф.* Динамические модели принятия решений в иерархических системах // Современное состояние теории исследования операций. – М.: Наука, 1979. – С. 18–44.
3. *Бунаков А.Э.* Анализ роли информированности в динамических моделях конфликтных ситуаций // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1981. Т. 21. N 4. – С. 844–852.
4. *Горелов М.А.* Максимальный гарантированный результат в иерархических играх // Управление большими системами. 2017. Вып. 67. – С. 4–31.
5. *Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А.* Опыт математического моделирования экономики. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 544 с.

# ОПТИМАЛЬНОСТЬ ПРИНЦИПА СОГЛАСОВАНИЯ В АКТИВНЫХ СИСТЕМАХ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Еналеев А.К.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
anverena@mail

*Аннотация. Рассматривается проблема согласования механизмов управления и поведения агентов при выборе стратегий в активной системе. Приведены условия оптимальности согласованных механизмов, обеспечивающих выполнение планов и сообщение достоверных данных. Приводятся примеры возможного применения согласованных механизмов.*

*Ключевые слова: Центр, агент, активная система, механизм, согласование, планирование, стимулирование, координация стратегий, манипулирование данными.*

## Введение

Принцип согласования является ключевым в теории активных систем (ТАС) [1]. Принцип согласования по своей сути заключается в учете интересов взаимодействующих сторон системы. В базовых моделях ТАС этими сторонами являются Центр, осуществляющий управление действиями одного или нескольких агентов, получивших название «активные элементы». Активный агент в силу наличия у него интересов, возможности самостоятельно выбирать свои действия и информировать о своем параметре, характеризующем его тип, взаимодействующих с ним подсистем (Центр и, возможно, других агентов), пытается получить выгодные для него управление от Центра и выбор действий других агентов. Одной из первых работ в ТАС [2], в которой был исследована процедура планирования, названная *законом открытого управления*, реализует принцип согласования. При планировании в соответствии с законом открытого управления Центр, с целью получить от агента достоверные данные о параметре, характеризующем тип агента, назначает самый выгодный для агента план, зависящий от сообщенных данных. Основным стимулом развития ТАС явилась монография В.Н. Буркова [3], в которой принцип согласования, и в частности закон открытого управления, был исследован для различных моделей активных систем и разработки деловых игр [4, 5]. Появление этой монографии породило значительное число публикаций по ТАС [1]. Новый цикл исследований был порожден публикацией [6]. В ней были получены условия согласования планов в активных системах при полной информированности Центра, А.К. Еналеевым была доказана теорема об оптимальности согласованного управления, если функция штрафов за отклонение действия агента от плана удовлетворяет «неравенству треугольника». В монографию [7] вошли результаты исследований В.Н. Буркова, А.К. Еналеева, В.В. Кондратьева по синтезу оптимальных механизмов, включающих процедуру планирования и функции штрафов за отклонение действия агента от плана в условиях полной информированности Центра. Показано, что оптимальный механизм содержится в множестве согласованных механизмов. На основе этих результатов были проведены дальнейшие исследования, защищенные кандидатскими и докторскими диссертациями.

В [8] была доказана оптимальность открытого управления в системе с «сильными штрафами» и отмечена связь этого результата с «согласованностью по стимулам» (incentive compatibility) в [9,10]. Детальное обсуждение проблем согласованности и неманипулируемости и связь отечественных исследований с зарубежными приведено в обзоре [1].

Исследованию проблем согласования для системы со связанными между собой агентами при полной информированности центра, с вероятностной и интервальной неопределенностью посвящено значительное число работ Д.А. Новикова. Обобщение результатов его исследований приведено в монографиях [11-13] и статьях [14 -17 и др.]. Проблемы согласования в задаче распределения ресурсов и активной экспертизы исследованы в [18-21].

В [22] с применением принципа согласования для модели активной системы при неполной информированности Центра о типе агента, когда целевая функция агента включает функцию поощрения за выбранное действие за вычетом функции штрафов за невыполнение плана и затрат на выбор действия, определен и исследован оптимальный механизм. Оптимальный механизм стимулирует агента сообщать в Центр достоверные данные о его типе и выполнять план. Полученные в [22] результаты позволяют определять оптимальные согласованные механизмы для ряда прикладных задач [23-27 ] и некоторых активных систем со связанными агентами [24, 28].

Состояние и перспективы исследований до 2020 г. по использованию принципа согласования в теории активных систем отражен в обзоре [1]. В настоящем докладе представлены некоторые результаты исследований автора по реализации принципа согласования [29-31], полученные после 2020 г. и не представленные в [1].

## 1. Оптимальность согласованного механизма управления в активной системе при неполной информированности Центра

Как было отмечено выше, в [8] была доказана оптимальность открытого управления в системе с «сильными штрафами» за отклонение действия агента от плана, а в [9] вообще выбор действия агентами не, рассматривается, т.е. по сути рассматривается только назначение плана, и исследуется проблемы неманипулирования данными со стороны агентов и реализуемости неманипулируемого механизма. В моделях активных систем [3] стратегиями агента являются как сообщение агентом данных о его типе, так и выбор агентом действия, которое может не совпадать с планом. Оказывается, как показано в [28] использование условий совершенного согласования [8] не обеспечивает в общем случае сообщение агентом правдивых данных и выполнение плана (равенство действия агента с назначенным ему планом). В следующем подразделе приводятся теоремы, определяющие условия правильности механизмов (сообщения правдивых данных и выполнения плана) и оптимальности таких механизмов.

### 1.1. Модель и постановка задачи

Рассмотрим активную систему, состоящую из *агента* и управляющего органа, который будем называть *Центром*. Целевая функция агента имеет вид  $f(x, y, r) = h(y, r) - \chi(x, y)$ , где  $y$  – действие агента, определяющее его состояние,  $x$  – план, устанавливаемый Центром для агента (может иметь интерпретацию, как желательное с точки зрения Центра значение действия агента),  $r$  – параметр, характеризующий тип агента,  $h(y, r)$  – функция дохода агента, зависящая от выбора действия агента,  $\chi(x, y)$  – функция штрафа за отклонение действия агента от плана. Пусть  $y \in Y$ ,  $x \in Y$ ,  $r \in A$ ,  $\chi(x, y) \geq 0$ ,  $\chi(y, y) = 0$ , множество  $Y$  наделено топологией и компактно,  $A = [r^H, r^B]$ , где  $r^H$  и  $r^B$  – нижняя и верхняя границы параметра. Предполагается, что функции  $h(y, r)$  и  $\chi(x, y)$  таковы, что определены максимумы целевых функций агента по  $y$  и  $r$ .

Целевую функцию Центра обозначим  $F(x, y, r)$ . Предполагается также, что определен максимум функции  $F(x, y, r)$  на ее области определения.

Предположим, что в системе имеется несимметричная информированность о параметре  $r$ . А именно, агент знает значение своего типа  $r$ , а Центру известно только множество  $A$  принадлежности типа агента,  $r \in A$ . В условиях такой неполной информированности Центра, рассмотрим следующую схему функционирования активной организационной системы.

Первый ход делает Центр. Он выбирает механизм управления  $\mu = \{\pi(\cdot), \chi(\cdot, \cdot)\}$ , включающий процедуру планирования  $\pi(\cdot)$ , где  $\pi(\cdot) : A \rightarrow Y$ , и функцию штрафов  $\chi(x, y)$  из некоторого заданного множества допустимых функций  $\Omega$ . Далее состав и свойства множества  $\Omega$  будут определены.

Второй ход, состоящий из двух шагов, делает агент. На первом шаге агент сообщает Центру данные  $s$  о значении своего параметра  $r$ . В соответствии с установленным Центром механизмом планирования, агенту назначается план  $x = \pi(s)$ . После этого агент делает второй шаг, который заключается в выборе его действия  $y$ .

Рассмотрим правила, которым следуют Центр и агент, совершая свои ходы. Пусть агенту установлен план  $x = \pi(s)$ . Примем, что агент при выборе своего действия  $y^* = y^*(x, r) = y^*(\pi(s), r)$  стремится максимизировать свою целевую функцию  $f(x, y, r)$ :

$$y^* \in R(x, r) = \text{Arg max}_{y \in Y} f(x, y, r), \quad (1)$$

где  $y^* = y^*(x, r) = y^*(\pi(s), r)$  – выбор действия агентом в зависимости от назначенного плана. Обозначим  $\varphi(x, r) = f(x, y^*, r)$ .

Выполнение планов агентами при выборе действий определяется условием

$$f(x, x, r) = \max_{y \in Y} f(x, y, r) \quad (2)$$

На первом шаге своего хода агенты выбирают сообщения, стремясь максимизировать свою функцию предпочтения  $\varphi(\pi(s), r)$  по  $s$ :

$$\varphi(\pi(s^*), r) = \max_{s \in A} \varphi(\pi(s), r) \quad (3)$$

Сообщение достоверных данных выглядит следующим образом:

$$\varphi(\pi(r), r) = \max_{s \in A} \varphi(\pi(s), r) \quad (4)$$

Будем называть механизм управления правильным, если  $s^* = r$  и  $y^* = x$ .

Эффективность механизма  $\mu = \{\pi(\cdot), \chi(\cdot, \cdot)\}$  будем оценивать значением целевой функции Центра  $Q_\mu(r) = F(\pi(s^*), y^*, r)$  при выборе агентом стратегий  $s^*, y^*$ .

Примем, что целевая функция Центра обладает следующим свойством:

$$F(x, y, r) \leq F(y, y, r) \quad (5)$$

Выражение (5) означает, что Центр несет потери от невыполнения плана [3].

Пусть задан механизм управления  $\mu = \{\pi(\cdot), \chi(\cdot, \cdot)\}$ , для которого определены  $s^*$  и  $y^*$ . Проблема заключается в следующем. Существует ли правильный механизм  $\mu^\Pi = \{\pi^\Pi(\cdot), \chi^\Pi(\cdot, \cdot)\}$  такой, что

$$Q_\mu(r) = Q_{\mu^\Pi}(r) = F(\pi^\Pi(r), \pi^\Pi(r), r) = F(x, x, r), \quad (6)$$

т.е. существует ли правильный механизм, эффективность которого не ниже эффективности заданного?

## 1.2. Согласованность механизма планирования, основные теоремы

Пусть справедливо свойство *благожелательности агента при выборе действия*, которое равнозначно требованию: «Если  $x \in R(x, r)$ , то  $R(x, r) = \{x\}$ ». Иначе говоря, если выполнение плана не уменьшает выигрыш агента по сравнению с другим выгодным для него действием, т.е. если  $f(x, y^*, r) = f(x, x, r)$ , то он предпочтет выполнить план.

При благожелательности агента условием выполнения плана  $x$  агентом является  $x \in P_\chi(r) = \{u \mid f(u, u, r) \geq f(u, y, r), u \in Y, y \in Y\} = \{u \mid h(u, r) \geq h(y, r) - \chi(u, y), u \in Y, y \in Y\}$ , где  $P_\chi(r)$  по определению является множеством выполнимых планов для  $\chi(\cdot, \cdot)$ .

Вообще говоря,  $P_\chi(r) \subseteq Y_\chi^*(r) = \bigcup_{x \in Y} R_\chi(x, r)$ , где  $R_\chi(x, r)$  определяется формулой (1) для заданной функции штрафа  $\chi(\cdot, \cdot)$ . Интересен случай

$$P_\chi(r) = Y_\chi^*(r) \quad (7)$$

Он означает, что для любого выбираемого агентом действия  $y^*$  Центр может назначить план  $x = y^*$  и при этом, в силу  $\chi(y^*, y^*) = 0$  и (5), выигрыши агента  $h(y^*, r)$  и Центра  $F(y^*, y^*, r)$  не уменьшатся. В этом смысле планы из множества  $P_\chi(r)$  являются согласованными, и (7) определяет «максимально согласованный механизм» [6,7].

**Теорема 1** [6]. Если функция штрафов удовлетворяет «неравенству треугольника»:

$$\chi(x, y) \leq \chi(x, u) + \chi(u, y) \quad (8)$$

для всех  $x, y, u \in Y$ , то справедливо (7).

Условие (7) вместе с теоремой 1 определяют требования к механизму, обеспечивающему выполнение планов.

Аналогично свойству *благожелательности агента при выборе действий* примем гипотезу о *благожелательности агента при сообщении данных*: «Если  $\exists s \in A, s \neq r$ , такое что  $\varphi(\pi(s), r) = \varphi(\pi(r), r)$

, то агент выберет сообщение  $s^* = r$ . При справедливости обеих гипотез о благожелательности будем говорить, что *агент благожелателен*.

**Теорема 2** [29]. Если для благожелательного агента выполняется (8), тогда необходимым и достаточным условием правильности механизма  $\mu = \{\pi(\cdot), \chi(\cdot, \cdot)\}$  является выполнение условия совершенного согласования вида

$$\varphi(\pi(s), s) = \max_{x \in X_\chi^c \cap P_\chi(s)} \varphi(x, s), \quad (9)$$

где  $X_\chi^c$  – компактное множество, устанавливаемое Центром при заданной функции штрафа  $\chi(\cdot, \cdot)$ , такое что  $\forall s \in A: X_\chi^c \cap P_\chi(s) \neq \emptyset$ .

Теорема 2 определяет множество правильных процедур планирования, или согласованных механизмов, удовлетворяющих условиям «максимального» (7) и «совершенного» (9) согласования.

**Теорема 3** [29]. Пусть для заданной функции штрафов справедливо (8), тогда для любого допустимого механизма планирования  $\pi(\cdot): A \rightarrow Y$  существует правильная процедура планирования  $\pi^\Pi(\cdot)$  не меньшей эффективности (6):  $Q_\pi(r) = F(\pi(s^*), y^*, r) \leq Q_{\pi^\Pi}(r) = F(\pi^\Pi(r), \pi^\Pi(r), r) = F(x, x, r)$ , где  $s_\pi^*, y_\pi^* = y_\pi^*(s_\pi^*)$ , сообщение и действие агента при процедуре планирования  $\pi(\cdot)$ .

Из Теоремы 3 следует, что оптимальная процедура планирования содержится в множестве правильных процедур планирования.

### 1.3. Оптимальный согласованный механизм

Пусть задана некоторая функция штрафа  $\chi(x, y)$ . Для заданной функции штрафа  $\chi(x, y)$  определим показатель ее максимального роста (ПМР) [22] как  $\omega_\chi(y, u) = \max_{x \in X} [\chi(x, u) - \chi(x, y)]$ . Заметим, что ПМР удовлетворяет свойствам функции штрафа и неравенству (8). Функция  $\omega_\chi(y, u)$  удовлетворяет «неравенству треугольника» [7].

Пусть задана функция  $\omega(x, y)$ , удовлетворяющая «неравенству треугольника». Примем ее в качестве максимального ПМР. При заданном ПМР определим множество допустимых функций штрафа:  $\Omega = \Omega_\omega = \{\chi(x, y) \mid \chi(u, y) - \chi(u, x) \leq \omega(x, y), \forall u, x, y \in Y\}$ .

В соответствии с Теоремой 3 обозначим  $\pi_\chi^*(\cdot)$  оптимальную правильную процедуру планирования, удовлетворяющую условиям максимального и совершенного согласования (9).

**Теорема 4** [30]. Существует оптимальный правильный механизм управления  $\mu^* = \{\pi_\omega^*(\cdot), \omega(\cdot, \cdot)\}$ , удовлетворяющий максимальному (7) и совершенному (9) условиям согласования.

Теорема 4 определяет достаточные условия существования оптимального механизма, который обладает свойствами согласованности (7) и (9).

## 2. Некоторые применения принципа согласования в некоторых моделях организационного управления

### 2.1. Согласованное управление в сетевой организационной структуре

Рассмотрим систему, состоящую из  $n$  агентов. Пусть агенты выбирают действия (стратегии)  $y_i$  из множеств допустимых действий  $Y_i$ , т.е.  $y_i \in Y_i, i \in I = \{1, \dots, n\}$ . Предположим, что множества  $Y_i$  компактны и  $Y_i \subset Y$ , где  $Y$  – компактное множество из  $R^n$ .

Этой системе поставим в соответствие ориентированный граф без контуров  $G=(I, A)$ , где  $I$  – множество, состоящее из  $n$  вершин, соответствующих агентам,  $A$  множества дуг.

Граф  $G$  описывает структуру зависимости выигрыша агента от влияния действий своего окружения. Пусть выигрыши агентов определяются целевыми функциями

$$f_i(x_i, y_i, \bar{y}_{-i}) = h_i(y_i) - \chi_i(x_i, y_i) - \sum_{j \neq i} \lambda_{ij}(\xi_{ij}(y_j), y_i)$$

где  $\bar{y}_{-i} = (y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_n)$  – действия всех агентов за исключением  $i$ -го агента,  $h_i(y_i)$  – функция непосредственного дохода агента при выборе действия  $y_i$ ,  $\chi_i(x_i, y_i)$  – штрафы, устанавливаемые Центром агенту за отклонение решения  $y_i$  от назначенного Центром плана  $x_i, x_i \in Y, \chi_i(x_i, y_i) \geq 0, \chi_i(y_i, y_i) = 0$ .  $\lambda_{ij} = \lambda_{ij}(\xi_{ij}(y_j), y_i)$  – функции потерь агента  $i$  за отклонение его действия  $y_i$  от его оценки  $\xi_{ij}(y_j)$  действия агента с номером  $j$ , где  $\xi_{ij}(\cdot)$  – однозначное отображение множества  $Y_j$  в  $Y_i$ . Примем



$\lambda_{ij}(\xi_{ij}(y_j), y_i) \geq 0$ ,  $\lambda_{ii}(y_i, y_i) = 0$  и  $\lambda_{ij}(\xi_{ij}(y_j), y_i) = 0$ , если  $\xi_{ij}(y_j) = y_i$ . Пусть функции потерь  $\lambda_{ij}$ , которые не равны тождественно нулю на всей области определения, соответствуют дугам графа  $G$ .

Такая модель связей агентов в рассматриваемой системе, а именно, наличие функций потерь  $\lambda_{ij}$ , позволяет исследовать степень влияния агентов друг на друга.

Предположим, что функции  $h_i(y_i)$  полунепрерывны сверху, а  $\lambda_{ij}(\xi_{ij}(y_j), y_i)$  полунепрерывны снизу по всем переменным, каждый из которых может принимать значение на множестве  $Y$ ,  $\bar{y}$  – совокупность действий всех агентов,  $\bar{y} \in \bar{Y} = \prod_{i \in I} Y_i$ .

Предположим, что агенты выбирают действия  $y_i^*$  из условия

$$y_i^* \in Z_i(x_i, \bar{y}_{-i}^*) = \text{Arg max}_{y_i \in Y_i} f_i(x_i, y_i, \bar{y}_{-i}^*). \quad (10)$$

Рассмотрим два произвольных агента с номерами  $i$  и  $j$ . Обстановка для агента  $j$  определяется выбором действий  $\bar{y}_{-j} = (y_1, \dots, y_{j-1}, y_{j+1}, \dots, y_n)$  остальными агентами. При фиксированной обстановке рассмотрим множество  $Z_j(x_j, \bar{y}_{-j}) = \text{Arg max}_{y_j \in Y_j} f_j(x_j, y_j, \bar{y}_{-j})$  рациональных действий для агента с номером  $j$ . Агент  $i$  может выбором своего действия  $y_i$  влиять на множество  $Z_j(\bar{y}_{-j})$ .

Представим целевую функцию агента  $j$  в виде

$$\begin{aligned} f_j(x_j, y_j, \bar{y}_{-j}) &= h_j(y_j) - \chi_i(x_j, y_i) - \sum_{m \neq j, i} \lambda_{jm}(\xi_{jm}(y_m), y_j) - \lambda_{ji}(\xi_{ji}(y_i), y_j) = \\ &= H_{-i}^j(x_j, y_j, \bar{y}_{-(j,i)}) - \lambda_{ji}(\xi_{ji}(y_i), y_j), \end{aligned}$$

где  $H_{-i}^j(x_j, y_j, \bar{y}_{-(j,i)}) = h_j(y_j) - \chi_i(x_j, y_i) - \sum_{m \neq j, i} \lambda_{jm}(\xi_{jm}(y_m), y_j)$ . Здесь  $\bar{y}_{-(j,i)}$  обозначает набор

действий всех агентов кроме агентов  $i$  и  $j$ .

Исследуем условия, при которых функция  $\lambda_{ji}(\xi_{ji}(y_i), y_j)$  побуждает агента  $j$  выбирать действие, совпадающее с  $\xi_{ji}(y_i)$ . Реализация этих условий и соответствующий выбор действия позволяет говорить о *сильном влиянии* агента  $i$  на агента  $j$ .

Для обеспечения однозначности выбора действий агентами при максимизации своей целевой функции примем гипотезу о благожелательности агентов, аналогичную рассмотренной выше гипотезе благожелательности относительно выполнения агентом плана.

Рассмотрим множество  $\bar{Z}_j^i(x_j, \bar{y}_{-(j,i)}) = \bigcup_{y_i \in Y_i} Z_j(x_j, \bar{y}_{-j})$  всех «выгодных» для агента  $j$  действий при заданном плане  $x_j$  при любом действии агента  $i$ , а именно, всех действий, доставляющих максимум целевой функции агента  $j$  при всех допустимых действиях  $y_i \in Y_i$  агента  $i$  и фиксированных допустимых действиях  $\bar{y}_{-(j,i)}$  всех агентов за исключением действий агентов  $i$  и  $j$ .

Обозначим

$$\begin{aligned} P_j^i(x_j, \bar{y}_{-(j,i)}) &= \{z_j \mid z_j = \xi_{ji}(y_i), \text{ где } y_i \in Y_i, z_i \in Y_j, H_{-i}^j(x_j, z_j, \bar{y}_{-(j,i)}) \geq \\ &\geq H_{-i}^j(x_j, y_j, \bar{y}_{-(j,i)}) - \lambda_{ji}(z_i, y_j), y_j \in Y_j\} \end{aligned}$$

множество взвешенных действий агента  $i$ , которые выгодно агенту  $j$  реализовать как  $y_j^* = \xi_{ji}(y_i)$ .

Функцию потерь  $\lambda_{ji}(\xi_{ji}(y_i), y_j)$  для агента  $j$  назовем, используя терминологию [6,7,22], «максимально-согласованной», если

$$P_j^i(x_j, \bar{y}_{-(j,i)}) = \bar{Z}_j^i(x_j, \bar{y}_{-(j,i)}) \quad (11)$$

при всех допустимых действиях агентов с номерами, принадлежащими множеству  $I \setminus (i, j)$ , т. е. номерами всех агентов кроме агентов  $i$  и  $j$ .

Соотношение (11) естественно назвать условием максимально-согласованного влияния.

Далее будем рассматривать класс функций потерь  $\lambda_{ij}(\cdot, \cdot)$ , где  $i, j \in I$ , обладающий следующим свойством: функции потерь агентов удовлетворяют «неравенствам треугольника»:

$$\lambda_{ji}(y, z) + \lambda_{ji}(z, u) \geq \lambda_{ji}(y, u) \quad (12)$$

Для максимальной согласованности (11) функций потерь агента  $j$  по отношению к агенту  $i$  достаточно выполнения неравенства «треугольника» (12) [6,30].

Таким образом агент  $i$ , выбирая свое состояние  $y_i$  такое, что  $\xi_{ji}(y_i) \in P_j^i(x_j, \bar{y}_{-(j,i)})$  может влиять на выбор состояния агентом  $j$ . Более того в этом случае состояние агента  $j$  совпадает с «желаемым» состоянием для агента  $i$ . Это свойство будем называть сильным влиянием агента  $i$  на агент  $j$ , а  $P_j^i(x_j, \bar{y}_{-(j,i)})$  назовем *областью сильного влияния* агента  $i$  на агент  $j$ .

Рассмотрим множество согласованных планов  $X^* = \{\bar{x} = \{x_i\} / x_i \in P_i(\bar{x}_{-i}), i=1, \dots, n\}$ , где

$$P_i(\bar{x}_{-i}) = \{x_i \in Y_i(\bar{x}^i) | h_i(x_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{ij}(\xi_{ij}(x_j), x_i) \geq h_i(y_i) - \chi_i(x_i, y_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{ij}(\xi_{ij}(x_j), y_i), \forall y_i \in Y_i(\bar{y}^i)\}.$$

**Теорема 5** [31]. Если функции штрафов  $\chi_i(x_i, y_i)$  всех агентов удовлетворяют «неравенству треугольника»,  $X^* \neq \emptyset$ , то решения  $\bar{y}^* = \bar{x}^* \in X^*$  представляют собой равновесия по Нэшу в игре  $n$  агентов.

Назовем  $P_i(\bar{x}_{-i})$  множеством условно согласованных планов, так как назначаемый агенту из  $P_i(\bar{x}_{-i})$  план согласуется с интересами агента в том смысле, что ему выгодно выполнять этот план при условии выполнения планов остальными агентами.

Рассмотрим функции штрафов вида

$$\chi_i(x_i, y_i) = \chi_i^0(x_i, y_i) + \sum_{j \neq i, j=1}^n \delta_{ij}(x_i, y_i), \quad (13)$$

где  $\delta_{ij}(y_j, y_i) \geq \theta_{ij}(y_j, y_i) = \max_{z \in Y} [\lambda_{ij}(z, y_i) - \lambda_{ij}(z, y_j)]$ . Здесь для функций потерь  $\lambda_{ij}(\cdot, \cdot)$  не требуется, чтобы они удовлетворяли неравенствам (12), но требуется симметричность  $\lambda_{ji}(z, u) = \lambda_{ji}(u, z)$ . Функция  $\theta_{ji}(\cdot, \cdot)$  характеризует показатель максимального роста [22] функции потерь  $i$ -го агента при отклонении его решения от выбора  $j$ -го агента.

**Теорема 6** [31]. Если функции штрафов всех агентов имеет вид (13), функции  $\chi_i^0(x_i, y_i)$  удовлетворяют неравенству «треугольника», то  $x_i \in P_i^0(\bar{x}^i) = \{x \in Y_i(\bar{x}^i) | h_i(x) \geq h_i(y_i) - \chi_i^0(x, y_i), y_i \in Y_i(\bar{x}^i)\} \subset X^* \neq \emptyset$ , то  $\bar{y}^* = \bar{x}$  как доминантные стратегии.

Теорема 6 позволяет использовать соотношение (13) для определения назначения «сильных штрафов» в сетевых организационных структурах и позволяет определить оптимальный механизм при таких штрафах.

## 2.2. Применение принципа согласования для определения оптимальных механизмов в некоторых приложениях

Результаты работ [6, 8, 22, 24, 28] использованы для формирования предложений по формированию механизма управления в некоторых прикладных разработках [23-27].

В [23] с использованием теоремы 1 получены следующие результаты: построена модель согласования границ разнотипных кластеров информационного управления в транспортных сетях; исследована задача согласования границ полигонов управления в крупномасштабных сетевых структурах между различными типами разбиений сети на полигоны управления; определены условия, обеспечивающие меньшие затраты на управление при совпадении границ полигонов одного типа разбиения с границами полигонов другого типа разбиения; предложены механизмы стимулирования согласования структур разбиений сети. Решение такого рода задач актуально при исследовании задач управления движением и обслуживанием инфраструктуры в транспортных, в частности, железнодорожных сетях. Возможно применение для анализа других сетей, например, электрических, трубопроводных, телекоммуникационных.

На основе исследований [28] в [24] предложены согласованные механизмы стимулирования выполнения последовательности связанных между собой проектов развития железнодорожного транспорта с использованием альтернативных видов топлива.

Механизм согласованного планирования и стимулирования, сформированный на основе результатов из [22], применительно к энергосбережению рассмотрен в [25].

В [26] представлена модель организационного механизма финансирования и стимулирования проведения адаптационных мероприятий к изменению климата на объекте при неполной информированности управляющего органа. Предложен механизм стимулирования адаптационных работ к изменению климата, обеспечивающий сообщение управляющему органу достоверной информации от

объектов. Показано, что предложенный механизм является оптимальным в условиях неполной информированности управляющего органа.

Согласованное управление в модели двухканальной активной системы для организации управления транспортными средствами при переходе от ручного к автономному с использованием искусственного интеллекта предложено в [27].

### 3. Заключение

В статье приведены основные результаты исследований автора за период, начиная с предыдущей конференции ТАС-50 за исключением теоремы 1, которая была опубликована в [6] и приведена здесь, т.к. существенно использовалась при доказательстве последующих теорем. Таким образом, статья представляет отчет по исследованиям автора за указанный период и месте этих исследований в ТАС.

### Литература

1. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Коргин Н.А. Согласованность и неманипулируемость механизмов организационного управления: текущее состояние проблемы, ретроспектива, перспективы развития теоретических исследований // Автоматика и телемеханика. – 2021. N 7. – С. 5–37
2. Burkov, V. and Lerner, A. Fairplay in control of active systems // Differential Games and Related Topics. –North-Holland Publishing Company, Amsterdam, London. – 1971. – P. 164–168.
3. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. –255 с.
4. Коргин Н.А., Щепкин А.В. Имитационное моделирование базовых и комплексных механизмов управления в форме деловых игр // Материалы 9-ой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2016, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2016. Т.1. – С. 77-79.
5. Коргин Н.А., Корепанов В.О. Сравнительный анализ механизмов распределения ресурсов на основе экспериментов в форме деловых игр // Труды 17-й Апрельская Международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества (в 4 кн. Под редакцией Е. Г. Ясина). – М.: ВШЭ, 2017. Кн. 1. – С. 100-110.
6. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Кондратьев В.В. Двухуровневые активные системы. Цена децентрализации механизмов функционирования // Автоматика и телемеханика. –1980, № 6, – С.110-117.
7. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
8. Бурков В.Н., Еналеев А.К. Оптимальность принципа открытого управления. Необходимые и достаточные условия достоверности информации в активных системах // Автоматика и телемеханика. – 1985. N. 3. – С. 73-80.
9. Dasgupta P., Hammond P., Maskin E. The implementation of social choice rules: Some general results on incentive compatibility // The Review of Economic Studies. – 1979. – Vol. 46, N. 2. – P. 185-216.
10. Myerson, R. Incentive-compatibility and the bargaining problem // Econometrica. –1979. – Vol. 47. – P. 61–73.
11. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.
12. Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах. – М.: СИНТЕГ, 2003. – 312 с.
13. Новиков Д.А., Чхартушвили А.Г. Прикладные модели информационного управления. – М.: ИПУ РАН, 2004. – 129 с.
14. Новиков Д.А. Оптимальность правильных механизмов управления активными системами. I. Механизмы планирования // Автоматика и телемеханика. – 1997. № 2. – С. 154–161.
15. Новиков Д.А. Оптимальность правильных механизмов управления активными системами. II. Механизмы стимулирования //Автоматика и телемеханика. – 1997. № 3. – С. 161-167.
16. Enaleev A.K., Novikov D.A. Sustainable Control of Active Systems: Decentralization and Incentive Compatibility / IFAC-PapersOnLine. – Elsevier, 2021. Vol. 54, No.13. – P. 13-18.
17. Белов М.В., Новиков Д.А. Сетевые активные системы // Проблемы управления. – 2018. №1. – С. 47-57.
18. Корепанов В.О., Коргин Н.А., Блохина А.И. Сравнение механизмов распределения ресурса с помощью решения Нэша для торгов / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). –М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. – С. 605-616.
19. Korgin N.A., Korepanov V.O. Nash Bargaining Solution as Negotiation Concept for Resource Allocation Problem with Groves-Ledyard Mechanism // Contributions to Game Theory and Management. – 2021. Vol. 14. – P. 216-226, <http://hdl.handle.net/11701/33698>.
20. Коргин Н.А., Корепанов В.О. Синтез оптимального механизма активной экспертизы: конструктивное решение средствами компьютерного моделирования // Проблемы управления. – 2020. N. 5. – С. 30-38.

21. *Korgin N.A., Korepanov V.O.* Optimal Planning Solution's Simulation for the Active Expertise / Proceedings of the 2019 IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI). – М.: IEEE, 2019. V2. – P. 68-73, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8808040>.
22. *Еналеев А.К.* Оптимальность согласованных механизмов функционирования в активных системах // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2011. Выпуск 33. – С.143-166.
23. *Еналеев А.К.* Согласованные разбиения в сетевых организационных структурах // Проблемы управления. –2016. № 6. – С. 18-25.
24. *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 // Управление большими системами. Выпуск 76. – М.: ИПУ РАН, 2018. – С.219-238.
25. *Enaleev A.* Organizational Mechanisms to Promote Energy Efficiency // IFAC-PapersOnLine, – ELSEVIER, 2022. Vol. 55-9. – P. 372-377.
26. *Вега А.Ю., Еналеев А.К.* Комплексное оценивание влияния изменения климата и механизм финансирования адаптационных мероприятий для инфраструктурных объектов // Проблемы управления. – 2024, №2. – С. 42-59.
27. *Еналеев А.К.* Организационные технологии внедрения систем управления с искусственным интеллектом на транспорте // Научный информационный сборник. Транспорт: наука, техника, управление. – ВИНТИ РАН, 2023. № 12. – С. 15-25 .
28. *Еналеев А.К.* Оптимальность согласованных механизмов в сетевых организационных структурах // Проблемы управления. – 2020. № 1. – С. 24-38
29. *Еналеев А.К.* Правильные механизмы планирования в активных организационных системах с обменом информацией // Труды шестнадцатой международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023, Москва) 26-28 сентября 2023. – М.: ИПУ РАН, 2023. – С. 1655-1662.
30. *Еналеев А. К.* Оптимальность согласованного механизма управления в организационной активной системе при неполной информированности центра // Электронный препринт XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024 Москва, 17-20 июня 2024 г.). – М: ИПУ РАН, 2024. – С. 3723-3727
31. *Enaleev A.K.* Coordinated Management in Hierarchical Network Structures // Proceedings of 12th Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD'2019). – IEEE, 2019. – P. 1-5.

# ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАВКАМИ В ОНЛАЙН-АУКЦИОНАХ И АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Жуховицкий К.М., Киселева Т.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия*  
sleemhouse@gmail.com, kis@siu.sibsiu.ru

*Аннотация: В докладе рассмотрены вопросы развития интернет-рекламы в целом и онлайн-аукционов в частности. Изучен принцип формирования цен на выкуп рекламных объявлений, а также позиции и очередности показа. Описана схема проведения онлайн-торгов по принципу механизма Викри-Кларка-Гровса. Приведены алгоритмы аукционов и управления ставками.*

*Ключевые слова: аукцион, интернет-аукцион, онлайн-аукцион, аукцион второй цены, обобщенный аукцион первой цены, аукцион Викри, аукцион Викри-Кларка-Гровса, VCG-аукцион, бид-менеджер, контекстная реклама.*

## Введение

В 1994 году, когда появилась первая реклама в интернете, она была устроена точно так же, как реклама в газете, на билборде или в телевизоре. Особенность такой рекламы заключалась в том, что она никак не связана с ее потребителями, показывалась всем, кто физически может ее увидеть, то есть каждому посетителю сайта. Размещение рекламы по такому принципу зависит только от места размещения и продолжительности по времени, за которое и взимается оплата с рекламодателей. К слову, такая реклама размещается до сих пор, например, на баннерах новостных сайтов, или реклама у блогеров.

Развивались поисковые системы, которые агрегировали огромное количество пользователей на одной странице, где рекламное место сильно ограничено. Так в 1997 году компания Overture, которую позже выкупила Yahoo, придумала принцип контекстной рекламы, когда рекламный баннер показывается не всем подряд, а исходя из поискового запроса пользователя. После чего, разные люди, вбивающие разные поисковые запросы, видели разную рекламу на одной и той же странице.

С ростом количества пользователей интернета, росло и количество рекламодателей. Даже разбивая рекламные объявления по различным направлениям деятельности, которые уже зависели от запросов пользователей сайта, все равно на каждое направление претендовал далеко не один рекламодатель, а десятки, на некоторые направления даже сотни. Возникла идея устраивать аукцион между ними. К тому же аукцион решал еще и задачу очередности, кто после кого будет показываться, а если рекламных мест несколько на одной странице, то - кого расположить выше, а кого ниже. Рекламодатели выбирали ключевые запросы для показа и назначали ставки, объявление с самой высокой ставкой показывалось на первой позиции, остальные по убыванию ставок. Работал обобщенный аукцион первой цены, который хоть и имел свои недостатки (они будут рассмотрены ниже), но на начальном этапе был очень удачной идеей, как для желающих разместить рекламу, так и для площадки, размещающей ее, что дало сильный толчок в развитии интернета в целом.

## 1. Развитие интернет-аукциона

Обобщенный аукцион первой цены имел ряд недостатков. Рост числа участников, а также следовавшее за этим сильное увеличение конкуренции за рекламное место, стали приводить к нестабильным и неконтролируемым ситуациям, например, к сильному занижению ставок. Так как участники платят ровно ту цену, которую выставляют, никто из них не будет конкурировать друг с другом, повышая ставку в ущерб своей рентабельности. Вместо этого в ход пошли бесконечные изменения ставок настолько часто, на сколько это было возможно, что создавало огромные на тот момент нагрузки на серверы. При этом заявки очень сильно зависели от представлений о действиях конкурентов, что давало существенное преимущество крупным игрокам и ограничивало мелких. В общем случае обобщенный аукцион первой цены неустойчив по Нэшу, то есть не существует ситуации, в которой каждый участник доволен сделанной ставкой и не хочет ее изменить.

Этот формат аукциона в контекстной рекламе использовался около пяти лет, пока Google не предложили свой вариант более устойчивой модели проведения аукционов, а именно аукцион второй цены или аукцион Викри. Аукцион Викри (назван в честь Уильяма Викри) — это алгоритм проведения однораундного закрытого аукциона (т.е. его участники не знают ставок друг друга). Победитель назначается по наивысшей ставке и получает лот по цене той ставки, которая бы сыграла, если бы он не участвовал. Этот формат имеет устойчивую доминирующую стратегию участников — указывать истинную ценность лота, завышать или занижать ставки невыгодно. К тому же организатор аукциона получает (в качестве бонуса) полную информацию о реальных оценках каждого из участников, даже если они хотели бы скрыть свои оценки.

Интернет развивался, все больше сфер бизнеса начинали использовать его для онлайн-торговли. Офлайн-бизнес также стал активно использовать интернет для привлечения клиентов. Структура

рекламы усложнялась, количество ключевых запросов у одного рекламодателя могло достигать до сотен тысяч. Выставить ставки по каждому из них вручную уже было довольно сложно. В рекламных системах, таких как Яндекс или Google, стали появляться инструменты автоматического выставления ставок. С их помощью можно быстро назначить ставки для большого количества фраз, даже если они относятся к разным кампаниям или группам объявлений. Объем ставки можно установить исходя из прогноза объема трафика или позиции на поиске, или назначить единую ставку, увеличить или уменьшить на заданную величину или процент. Таким образом стало возможно через ставки управлять не только количеством трафика, но и позицией в поисковой выдаче.

Позже Яндекс опубликовал статистику, в которой дал оценку каждой позиции поискового объявления в условно-прогнозируемых процентах кликабельности CTR (от англ. click-through rate — определяется как отношение числа кликов на баннер или рекламное объявление к числу показов этого баннера, измеряется в процентах), в среднем по всем регионам и направлениям бизнеса, где первое место в специальном блоке над поисковой выдачей берется за 100%. Вероятность перехода по второй строчке оценивается на 15% ниже. По третьей — на 25% ниже, чем по первой, а по четвертой — на 35% при прочих равных. Так каждый рекламодатель получит условно 100, 85, 75 и 65 процентов трафика соответственно.

Кликабельность стала важным параметром для рекламной системы с тех пор, как модель расчетов сменилась с оплаты за тысячу показов на оплату за клики. Показы сложно отслеживаются рекламодателем, и не всем очевидна их эффективность. На самом деле Яндекс по-прежнему зарабатывает на показах рекламы, просто теперь добавился такой показатель, как CTR. Можно сказать, что этот показатель определяет эффективность работы объявления. Если у объявления увеличивается CTR, то Яндексу уже нужно потратить меньше показов, чтобы получить с рекламодателя столько же денег. Исходя из этого, первое место в рекламной выдаче выгодно отдавать тому, кто заплатит больше остальных, а далее по убыванию ставок.

Если используется несколько рекламных мест на одной странице, то работает обобщенная версия механизма Викри, позиционный аукцион Викри-Кларка-Гровса (VCG) — это тип многотоварных аукционов закрытой формы, назван в честь Вильяма Викри, Эдварда Кларка и Теодора Гровса, которые в своих статьях успешно обобщили идею аукциона Викри для одностоварного аукциона на случай многотоварного. Участники определяют ставки, которые соответствуют их оценкам ценности товаров, не зная ставок других участников. Аукцион распределяет товары «социально оптимальным» образом (по отношению к участникам аукциона, участник максимально оценивающий товар, гарантированно получает его): каждый участник аукциона платит цену, равную воздействию его участия на результат аукциона (исходя из того, как его участие воздействует на всех остальных участников). Такой аукцион учитывает влияние каждого участника на остальных. Причем учитываются и те, кто вообще не попадает в выдачу, то есть проигрывает, занимая последнее место, но его ставка влияет на предпоследнего участника, определяя цену, которую он заплатит за клик. В этом существенное отличие от однородной ситуации, где нет перемещений, а разыгрывается только одно место.

Рассмотрим пример. Есть пять рекламодателей, которые конкурируют за четыре рекламных места в специальном блоке на первой странице поиска. Их ставки по ключевой фразе равны: 10, 7, 5, 3 и 2 рубля. Для простоты предположим, что у них у всех одинаковый показатель кликабельности CTR. Первые четверо займут места в порядке убывания ставки, и получают 100, 85, 75 и 65 процентов трафика соответственно. На самом деле это не обычные проценты в классическом понимании, а скорее условные единицы трафика, потому что рассчитываются они в идеальных условиях и в целом по всем рекламодателям всех направлений бизнесов в сумме, и носят, скорее, оценочный характер, отражающий относительность позиций друг к другу. А пятый участник вообще не попадет в выдачу. Теперь посчитаем, кто сколько заплатит за клик на своей позиции. Если уйдет четвертый участник, то пятый займет его место на четвертой позиции и получит 65 единиц трафика по 2 руб. Именно эту цену и заплатит четвертый в случае клика по его объявлению. Если уйдет третий, то пятый также получит 65 единиц трафика по 2 руб., а четвертый займет третью позицию и получит на 10 единиц трафика больше, чем изначально ( $75 - 65 = 10$ ) по 3 руб. Таким образом, третий заплатит за клик  $(2 \cdot 65 + 3 \cdot 10) / 75 = 2,13$  руб. Если уходит второй участник, то произойдут те же события, только еще третий переходит на второе место и получает дополнительно ( $85 - 75 = 10$ ) единиц по 5 руб. В итоге второй заплатит  $(2 \cdot 65 + 3 \cdot 10 + 5 \cdot 10) / 85 = 2,47$  руб. Ну и первый, уходя, отдаст второму свое место и 15 единиц дополнительного трафика по 7 руб. Цена для первого считается аналогично:  $(2 \cdot 65 + 3 \cdot 10 + 5 \cdot 10 + 7 \cdot 15) / 100 = 3,15$  руб. (рисунок 1). Каждый платит средневзвешенную цену всех, кто стоит ниже него в аукционе.

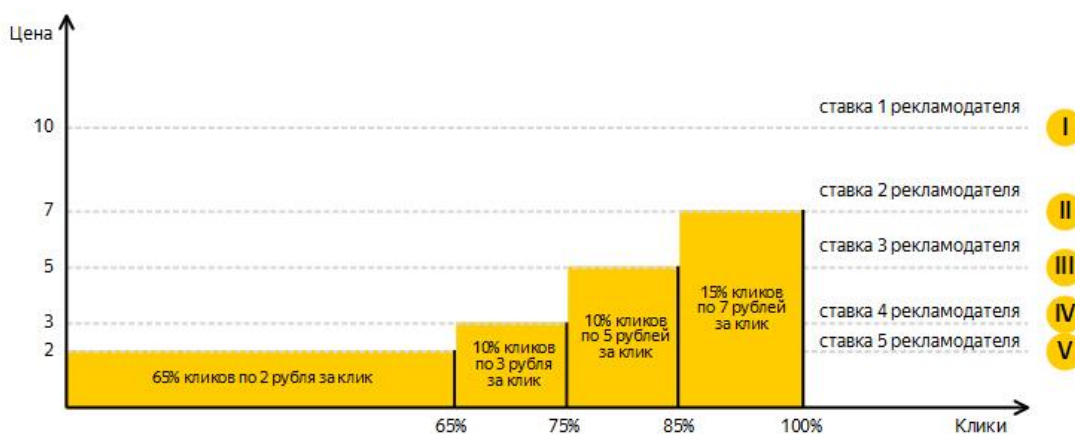


Рис. 1. Принцип работы VCG-аукциона в Яндекс Директ

Рассмотрим ситуацию с рекламодателями из примера выше. Пусть каждый из них выкупает определенный объем трафика и платит за него определенные деньги. 1000 кликов первый рекламодатель, 850 второй, 750 третий, 650 четвертый, и пятый постоянно проигрывает и показывается в других блоках, не попадая в спецразмещение. Предположим, что у всех искренняя ставка, которую они честно могут себе позволить выставить, не испытывая убытков выше, чем текущая, и все имеют запас 3 рубля. Такое редко бывает в жизни, и как раз означает, что аукцион еще не разогрет, но предположим, что у нас именно такая ситуация. Посчитаем, к чему приведет повышение ставки на 3 руб. всеми участниками этого аукциона одновременно. В итоге у первого рекламодателя общий бюджет увеличивается на 95%, а у последнего рекламодателя на 150%. При этом не поменяется вообще ничего, каждый из них будет продолжать покупать ровно столько трафика, сколько покупал до повышения ставки. В этом заключается проблема нетривиальности расчета ставки в VCG-аукционе, а также ее возможная немонотонность.

Стоит отметить, что при повышении всех ставок ровно в 2 раза, и бюджеты всех рекламодателей увеличатся тоже ровно в 2 раза, и при этом также ничего не изменится, все будут продолжать покупать прежнее количество трафика без изменений.

Существенное различие между оценкой лота и итоговой ценой контракта воспринимается участниками как несправедливая оценка, особенно для тех, кто занимает более низкие позиции. Например, если рекламодатель готов платить за клик 161 рубль 50 копеек максимум (рисунок 2), и он делает такую ставку, тогда на самом деле он выкупает всего 74% объема трафика, хотя мог бы выкупить 100% за эти деньги. То есть он выкупает меньше, чем мог бы себе позволить. По сути, рекламодатель начинает терять трафик, выставляя честную цену.

Объем трафика	Прогноз ставки, руб.	Спис. цена, руб.	Ставка, руб.	Прогноз трафика
139	3 189.30	338.30	161.50	74
<u>100</u>	321.60	<u>115.30</u>		
75	163.00	54.20		
15	37.40	26.40		
5	16.20	16.20		

Рис. 2. Пример выставления ставок в Яндекс Директ

В настоящий момент интернет-реклама стала главным источником привлечения новых клиентов для многих компаний. Попадание в блок спецразмещения Яндекса для них вопрос не просто очень важный, но и принципиальный. Поражение в аукционе на протяжении одного дня может существенно отразиться на месячной выручке всей компании. Поэтому конкуренция в некоторых сферах бизнеса доходит до предела. Аукцион разогрет, и возникает потребность чаще пересчитывать и корректировать ставки.

Ниже приведем алгоритм работы механизма Викри-Кларка-Гровса в общем виде.

## 2. Алгоритм работы механизма Викри-Кларка-Гровса

На рисунке 3 изображена схема алгоритма Викри-Кларка-Гровса в общем виде (рисунок 3).

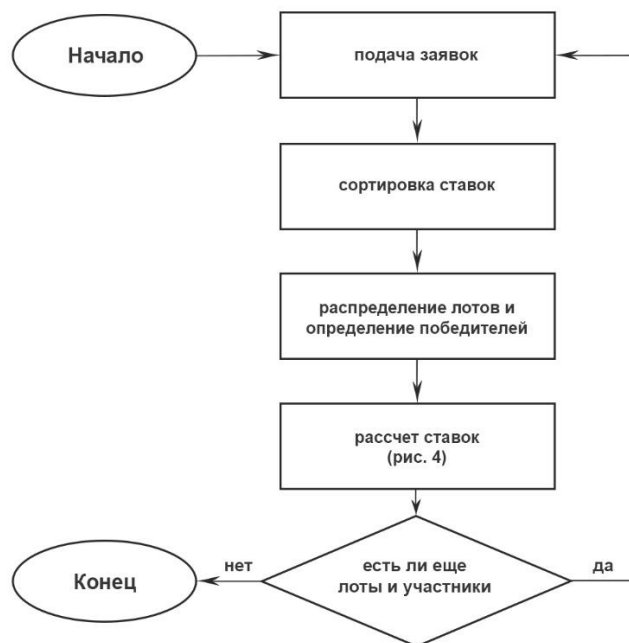


Рис. 3. Алгоритм Викри-Кларка-Гровса

На первом шаге участники однократно подают заявки в закрытом виде на множество лотов.

На втором шаге все заявки сортируются по величине ставки, от максимальной по убыванию.

Далее игрок, сделавший максимальную по величине заявку, забирает наиболее ценный лот. Следующий по величине ставки игрок, соответственно забирает следующий по ценности лот, и так далее, пока не закончатся все лоты или игроки.

Каждый участник платит за свой лот сумму, в совокупности равную не сыгравшим ставкам остальных участников, которые бы сыграли при уходе этого участника, то есть если бы он не участвовал (подробнее об этом ниже).

Если борьба идет за 1 лот, то каждый  $n$ -й победитель платит цену  $(n+1)$ -ого игрока (рисунок 4).

Если лотов несколько, то суммы, которые заплатят игроки, будут определяться следующим образом:

- Делается сортировка победителей заново, но уже без данного участника;
- начиная с последнего игрока (дадим ему номер  $k$ ), то есть победителя, сделавшего наименьшую ставку (назовем его ставку  $b$ ), считается сумма, которую он должен заплатить (назовем ее  $S$ ), путем гипотетического удаления его из аукциона для расчета эффекта влияния его на остальных, например, при удалении последнего ( $k$ -ого) игрока, на его место встанет следующий за ним  $(k+1)$ , то есть проигравший игрок с максимальной ставкой, таким образом, последний игрок заплатит за свой лот сумму, равную максимальной ставке проигравшего игрока (то есть  $S=b+1$ );
- далее делается переход к предпоследнему  $(k-1)$  по величине ставки победителю, при отсутствии которого на его место встанет последний  $(k$ -ый) по величине ставки победитель, который, с одной стороны, имеет свою фактическую стоимость лота ( $S$ ), которую он реально заплатит и которая была высчитана на предыдущем шаге, с другой стороны у него есть ставка ( $b$ ), которую он поставил заходя в аукцион; мы учитываем обе эти суммы в формировании стоимости лота предпоследнего победителя  $(k-1)$ , которая будет равна сумме фактической стоимости лота ( $S$ ) и доли от ставки этого  $(k$ -ого) игрока ( $b$ ), то есть  $S-1=S+A*b$ , где  $A$  это коэффициент, отражающий ценность  $k-1$ -ого лота над  $k$ -ым; например если наименее ценный лот дает победителю условно 50 очков, а следующий, чуть более ценный лот дает его обладателю 70 очков, то коэффициент  $A$  будет высчитываться как  $A=(70-50)/50$ , то есть пропорционально его ценности; ценность лотов устанавливает организатор аукциона;
- и так далее для всех игроков повторяется предыдущий пункт, пока не будут посчитаны суммы для всех победителей.

Заканчиваем текущий аукцион и начинаем новый, если остались еще лоты и желающие поучаствовать.



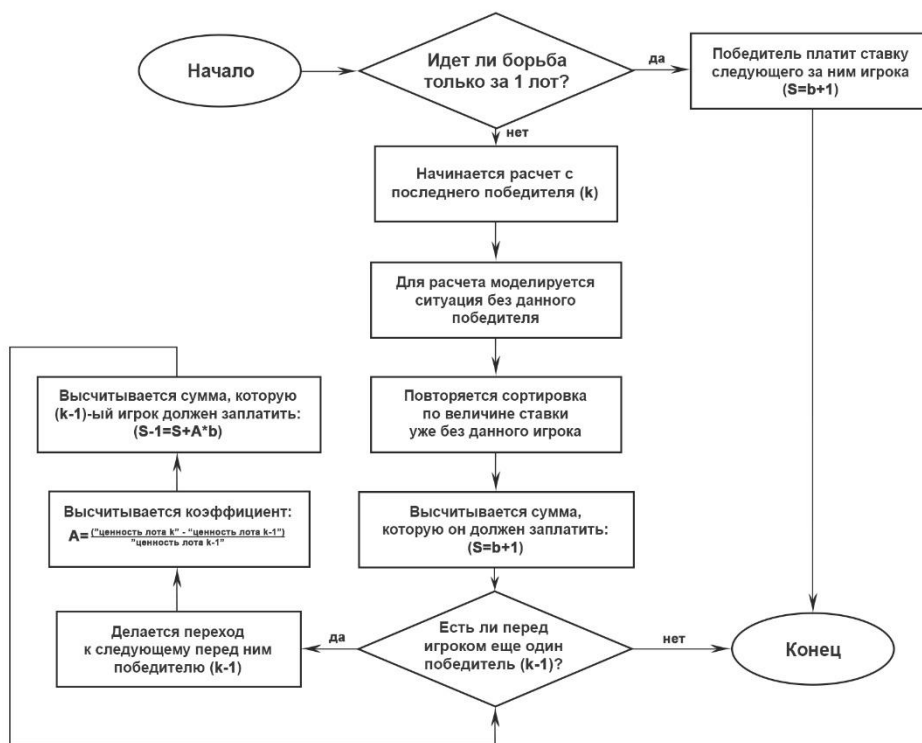


Рис. 4. Схема расчета ставок в механизме Викри-Кларка-Гровса

### 3. Контроль и назначение ставок с помощью биддеров

Потребность автоматизировать корректировку ставок возникла еще во времена Yahoo с обобщенным аукционом первой цены. Рекламодатели старались как можно быстрее реагировать на малейшие изменения рынка, чтобы получить выгодные места в аукционе и при этом потратить как можно меньше денег. Но с развитием рекламных кампаний, когда количество ключевых фраз внутри кампании стало доходить до нескольких иногда и сотен тысяч, и таких рекламодателей становилось все больше, стали активно развиваться биддеры контекстной рекламы.

Бид-менеджер или биддер – это специальная программа, которая автоматически контролирует и назначает ставки в Яндекс Директе и Google Ads. Такая программная система, название которой происходит от английского слова bid – ставка, избавляет рекламодателя при работе с контекстной рекламой от необходимости постоянно следить за условиями аукциона и вручную повышать или понижать ставки в рекламных объявлениях, чтобы они сохранялись на определенных позициях.

Сначала биддер представлял из себя просто автоматический процесс, который с определенной периодичностью получал данные о рекламной кампании, и проходя через простое условие, принимал решение о выключении или включении кампании. Это помогало спасти рекламный бюджет в ситуации, когда при большом количестве кампаний, человек не успевает отследить неэффективную стратегию и вовремя ее отключить. Или если нужно было задать жесткий временной промежуток показа рекламы, например, пару часов в день, а в рекламной системе минимальное время показа рекламы на одну кампанию составляло 40 часов в неделю.

Позже появились биддеры, которые управляли непосредственно ставками, по прямому их назначению. И первые настройки практически совпадали с настройками внутри рекламной системы. То есть биддер делал то же самое, что и рекламодатель мог сделать сам вручную, но делал это часто и постоянно, каждые 15 минут.

По формулам внутри рекламного кабинета пользователь мог управлять рекламным охватом. Система сама выдавала информацию о том, какой процент охвата можно купить за текущую ставку или какая ставка потребуется, чтобы получить желаемый охват аудитории (рисунок 5). Такая информация есть как в интерфейсе Яндекса, так и Google.



Рис. 5. Инструмент управления ставками в Яндекс Директ

Яндекс давал еще больше открытых данных для участия в аукционе. Например, было указано, какую ставку нужно поставить чтобы попасть на каждую позицию в спецразмещении, и, что еще более ценно, какая фактическая цена спишется, если по объявлению будет произведен клик (рисунок 6). Таким образом можно было посчитать, что выгоднее, поставить завышенную цену и выиграть аукцион, заплатив при этом гораздо меньшую цену, а самое главное, что эта цена была известна заранее.

	Объём трафика	Прогноз ставки, руб.	Спис. цена, руб.
<b>1-ая расширенная</b>	139	3 897.10	712.30
<b>1-ая позиция</b>	100	409.30	296.90
<b>2-ая позиция</b>	75	352.40	269.00
<b>5-ая позиция (гарантия)</b>	15	244.70	211.80
<b>(условно)</b>	5	176.90	176.90

Рис. 6. Прогноз цен и ставок по фразе для разных позиций в Яндекс Директ

Проблема заключалась лишь в том, что уже через минуту в аукционе менялись исходные данные, могли прийти новые участники, или уйти действующие, а также каждый из них мог корректировать свои ставки в это же время. Вручную заниматься этим процессом было нецелесообразно, да еще и рискованно. Выставив завышенную ставку, участник дает свое согласие рекламной площадке списывать любую, не превышающую ее цену, а так как другие участники действуют непредсказуемо, это приводило к растрате рекламного бюджета. Тут и раскрылся большой потенциал биддеров. Это был период популяризации биддеров и различных других сервисов, помогающих настраивать и управлять контекстной рекламой.

Такие биддеры получили название линейные, потому что в основе их работы лежали линейные формулы управления ставками. Например, одна из популярных стратегий заключалась в том, чтобы занимать третье место в спецразмещении, то есть самую нижнюю строчку в самом верхнем блоке. Верхний блок - спецразмещение показывается над результатами поиска, что обеспечивает качество целевой аудитории, а цена за третье место в нем самая дешевая из трех. Более того, третье место могло стоить в 3-5 раз дешевле первого. Также программа могла еще и сверить списываемую цену с максимально допустимой в настройках пользователя, что давало рекламодателю еще больше контроля над своим рекламным бюджетом.

Робот системы биддера каждые 15 минут получал текущие оценки рекламной системы по каждой ключевой фразе. Данные подгружались по всем позициям о списываемой цене и требуемой минимальной ставке (рисунок 7). Дальше он сравнивал списываемую цену за третье место с максимально допустимой в настройках, и если она подходила, то делалась ставка, требуемая за такое размещение. И так по очереди со всеми ключевыми фразами каждые 15 минут. Заострим внимание на том, что эта ставка могла быть очень сильно завышена, и без подобной программы рекламодатель никогда бы не решился выставить ее.

Название:	Макс. позиция по цене Макс ставки
Формула:	<pre> если (1СЦ меньше Макс * 1.05) {1С + 0.3} иначе если (2СЦ меньше Макс * 1.05) {2С + 0.3} иначе если (3СЦ меньше Макс) {3С + 0.3} иначе {0.3} </pre>

Рис. 7. Настройка стратегии назначения ставок в биддере

Для еще большей эффективности биддер сравнивал списываемую цену за третью позицию не только с максимумом, установленным пользователем, но и со второй позицией, и с первой. Иногда возникала такая ситуация, что списываемая цена за первое и второе или второе и третье места могла быть одинаковой или очень близкая. Можно было задать погрешность для сравнения, например, 3 рубля, или 5%, и когда второе место дороже третьего не больше, чем эта погрешность, выставлять ставку второго или первого места. Таким образом, стало возможно получить вторые и даже первые места показа бесплатно, особенно это обеспечивало серьезный эффект в конкурентных нишах. Вручную такие манипуляции осуществить не представлялось возможным.

Сейчас активно развиваются автоматические стратегии в самих рекламных системах. Автоматические стратегии в Яндекс Директе — это способ управления рекламными кампаниями, при котором ставки и показы объявлений регулируют не пользователи системы, а алгоритмы. Представители Яндекс открыто говорят на форумах и конференциях о том, что биддеры больше не нужны. Просто ставьте честную ставку, и нейросети, анализирующие бизнес и автоматически подбирающие ключевые фразы в системах автотаргетинга (технология показа объявлений, не использующая ключевые фразы, анализирует информацию в объявлении и на странице перехода и определяет, соответствует ли объявление поисковому запросу, интересам пользователя или тематике площадки, а также позволяет получить дополнительный целевой трафик благодаря показам аудитории, которую сложно охватить с помощью ключевых фраз), сами поставят нужные ставки и оптимизируют рекламу наилучшим образом. Рекламодатели уже активно используют автоматические системы, но бывают случаи, когда автоматика приводит к неэффективной растрате рекламного бюджета.

Действительно, автоматические стратегии работают. Автотаргетинг набирает популярность (в данный момент уже действуют правила, запрещающие полностью отключить автоматику в системе Яндекс Директ), иногда даже приводит к очень эффективному результату. Но для задач, связанных с оптимизацией машинным обучением, требуется большое количество накопленных данных. Специалисты Яндекса официально говорят об этом. Многие практикующие маркетологи и специалисты по настройке контекстной рекламы видят большой потенциал автоматических систем, но только при достаточном количестве собранной статистики. Имеется ввиду статистика каждого рекламодателя в отдельности. Такой подход снова создает неравенство между крупными игроками и мелкими предпринимателями, давая преимущество игрокам с большим рекламным бюджетом.

Даже во время активного развития автоматических стратегий, появляются новые вспомогательные инструменты, созданные помочь пользователям повысить эффективность рекламного размещения, новые биддеры. Один из современных сторонних инструментов управления ставками работает следующим образом. Рекламодатель запускает новую кампанию в автоматическом режиме на две недели. При этом должны быть настроены все системы сбора статистики для оценки эффективности. Через две недели появляется информация об израсходованном бюджете, о целевых действиях (конверсионных действиях — скрытые или прямые указания рекламодателей, продавцов, создателей сайта, например: покупка, регистрация, подписка, посещение определённой страницы сайта, переход по рекламной ссылке, и т.д.) на сайте, о цене клика, о CTR и т.п. Биддер анализирует стоимость целевого действия по ключевым фразам, а также выявляет те фразы, которые принесли такие действия, и вычисляет для них эффективную ставку. Система сама переводит кампанию с автоматического на ручное управление ставками. Для тех ключевых фраз, которые не привели к целевому действию, она выставляет минимальные ставки для обеспечения участия в аукционе. Если такие фразы начинают приносить клики, то система проверяет, не принесли ли они целевых действий. Если да, то ставка для них увеличивается, пока количество и стоимость целевых действий укладываются в установленные настройками рамки. Фразы без целевых действий снова отключаются, и начинается новый аукцион с минимальной для входа ставки. Все фразы должны быть готовы к участию в аукционе, так как в любой момент может начаться сезонный спрос, который сложно предугадать заранее.

## 4. Заключение

Таким образом, в статье показан процесс изменения принципа аукциона, начиная от традиционного и заканчивая аукционом Викри, а затем и обобщенной его версией в виде механизма Викри-Кларка-Гровса (VCG). Показана роль Бид-менеджеров, которые автоматически контролируют аукцион и назначают ставки в Яндекс Директ и Google Ads, что избавляет рекламодателя от необходимости постоянно следить за условиями аукциона и вручную повышать или понижать ставки в рекламных объявлениях, чтобы они сохранились на определенных позициях.

## Литература

1. *Vickrey, W.* (1961), COUNTERSPECULATION, AUCTIONS, AND COMPETITIVE SEALED TENDERS. *The Journal of Finance*, 16: 8-37. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1961.tb02789.x> (дата обращения: 04.03.2024).
2. *Савватеев А.В., Филатов А.Ю.* Занимательная экономика / Теория экономических механизмов от А до Я. - М.: изд. АСТ, 2022. - 128 с.
3. *B. Edelman, M. Ostrovsky, M. Schwarz*, Internet Advertising and the Generalized Second Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords. *The American economic review*, 2007, 97 (1): 242-259.
4. Яндекс Справка. О Яндекс Директе. *Yandex.ru*. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/support/direct/> (дата обращения: 04.03.2024).
5. Принципы проведения аукциона объявлений в контекстно-медийной сети. *Support.google.com*. [Электронный ресурс]. URL: <https://support.google.com/googleads/answer/2996564?hl=ru> (дата обращения: 04.03.2024).
6. *Hobbes' Internet Timeline 25. Zakon R.H.* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zakon.org/robert/internet/timeline> (дата обращения: 04.03.2024).

# МЕТАТЕОРЕМА КАК МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ ТЕОРЕМ СУЩЕСТВОВАНИЯ РАВНОВЕСИЯ В БЕЗОПАСНЫХ СТРАТЕГИЯХ

Искаков М.Б.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
mih\_iskakov@mail.ru

*Аннотация.* Представлен метод конструирования теорем существования РБС из известных теорем существования равновесия Нэша (РН). При этом исходная теорема существования РН приводится к стандартной формулировке, которая, как условие, вставляется в текст метатеоремы существования РБС.

*Ключевые слова:* равновесие в безопасных стратегиях, равновесие Нэша, теоремы существования решения игровых задач.

## Введение

Концепция РБС была предложена в статье [2]. Поскольку модель равновесия была более широкой, чем РН, то первоначальное направление исследований сводилось к поиску задач, для которых оно работает. Если рассматривать РН как базовую классическую модель решения в теории игр, то для очень многих задач оно не просто существует, но имеется большое множество РН, причем возникает проблема выбора из этого множества предпочтительных решений. Противоположный случай менее распространен, но имеется ряд классических задач, для которых РН не существует. Поскольку для представительной выборки задач без РН были найдены РБС решения, то естественно возник вопрос, можно ли получить какие-то общие условия существования РБС, очертить круг задач, к которым применимы данные решения, т.е. построить теорию существования РБС.

План теоретического обоснования равновесия в безопасных стратегиях как концепции решения игровых задач предполагал преодоление ряда проблем. В данном докладе представлены следующие: в качестве теоретической основы метода сформулирован вывод определения равновесия в безопасных стратегиях (РБС) как развитие концепции теоретико-игрового равновесия по Нэшу (РН); на этой основе разработан метод конструирования теорем существования РБС из известных теорем существования РН; при этом исходная теорема существования РН приводится к стандартной формулировке, которая вставляется в текст метатеоремы существования РБС как условие; метод конструирования теорем существования опробован на трех исходных теоремах: Дебре (1952) [3], Рени (1999) [4], Бика (2009) [5].

## 1. Идея метатеоремы

Поскольку равновесие Нэша является общепризнанной концепцией решения игровых задач в нормальной форме, то в литературе имеется большое количество теорем существования этого равновесия. Как из существующих теорем существования равновесия Нэша получить теоремы существования РБС? Их предлагается строить, как конструктор, из известных теорем существования РН, приведенных к стандартному виду. В литературе формулировки этих теорем различны. Требуется эквивалентно переформулировать их так, чтобы они различались только определенным условием, которое будет переменной частью в метатеореме. Метод конструирования теорем существования РБС основан на двух идеях. Первой составляющей является понятие сильной угрозы.

## 2. РБС и условие сильных угроз

Требуется наложить на игру такое условие, при котором можно было бы рассматривать игру только на множестве безопасных стратегий. В качестве самой общей идеи построения критерия существования РБС можно взять как аналогию принцип сильных штрафов в теории активных систем [1]. Принцип заключается в том, что «штрафы за отклонение от реализации плана настолько велики, что единственной разумной линией поведения предприятия является безусловное выполнение принятых обязательств» [1, стр.43]. То есть, если имеется множество желательных или приемлемых планов, то выход агентов за его пределы штрафует настолько сильно, чтобы исключить всякую мотивацию отклониться.

По аналогии, пусть есть множество безопасных стратегий, а любой опасный профиль содержит угрозы настолько серьёзные, что осторожный рациональный игрок всегда будет искать решения только в безопасном множестве. Насколько сильными, по минимуму, должны быть угрозы, чтобы обеспечить такой эффект? Ответ можно сформулировать следующим определением. Пусть дана игра  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  с соответствующей игрой угроз  $\tilde{G} = (S_i, v_i)_{i=1}^N$ .

**Определение.** Угроза игроку  $i$  в профиле  $s$  является **сильной**, если существует безопасная стратегия  $s' = (s'_i, s_{-i})$  такая, что  $u_i(s') = v_i(s') > v_i(s)$ . Для игрока  $i$  в игре  $G$  выполняется **условие сильных угроз**, если для него содержащиеся в любом опасном профиле угрозы являются сильными. Игра  $G$  называется игрой с **сильными угрозами**, если для всех игроков в ней выполняется условие сильных угроз.

То есть для любого профиля, небезопасного для игрока, существует отклонение этого игрока в такой безопасный профиль, в котором его выигрыш больше наихудшей угрозы в исходном профиле.

### 3. Исходная теорема

Вторая составляющая идеи теоремы существования РБС состоит в том, что если для игры выполняется требование сильных угроз и имеется некоторая известная теорема существования равновесия Нэша, то можно потребовать выполнения условий этой теоремы только на безопасном множестве (или даже на некотором предпочтительном подмножестве этого множества, содержащего в себе наилучшую безопасную альтернативу – достигаемое максимальное значение безопасного выигрыша), и этого будет достаточно для существования РБС.

Более формально можно описать этот подход следующим образом. Пусть имеется некоторое верное утверждение (исходная теорема, приведенная к стандартному виду): «Если для игры выполняется условие (#####), то в игре существует равновесие Нэша». Пусть это условие (#####) выполняется на множествах безопасных стратегий игроков. Такое предположение надо сформулировать строго.

Рассмотрим произвольную игру в нормальной форме:  $G = (N, S_i, u_i(s_1, \dots, s_n), i \in N, s_i \in S_i)$ . Обозначим как «(#####)» некоторое ограничивающее условие, однозначно определяющее подмножество множества всех возможных игр  $G$ . Это условие и будет переменной частью в метатеореме.

**Пример.** Определим функцию наилучшего ответа:  $BR_i(s_{-i}) = \operatorname{argmax}_{s_i \in S_i} u_i(s_i, s_{-i})$ . Пусть условие задается так: (#####) = (#1) = « $\forall i, \forall s_{-i}, \exists! BR_i(s_{-i})$ , функции  $BR_i(s_{-i})$  непрерывны по  $s_{-i}$ ». Это условие является достаточным условием для существования РН в игре. Для примера исходная теорема будет формулироваться так:

**Исходная теорема** (приведенная к стандартному виду): «Если для произвольной игры  $\Gamma$  выполняется условие:  $\forall i, \forall s_{-i}, \exists! BR_i(s_{-i})$ , функции  $BR_i(s_{-i})$  непрерывны по  $s_{-i}$ , то в игре существует равновесие Нэша».

### 4. Теорема существования РБС

Таким образом, если для игры выполняются два условия: условие теоремы существования равновесия Нэша на безопасном множестве и условие сильных угроз, то следует ожидать, что в данной игре имеется РБС. Условие исходной теоремы (#####) обеспечивает наличие равновесия в нужном множестве, а условие сильных угроз гарантирует его устойчивость в смысле РБС для всей игры. Теперь можно сформулировать метатеорему.

**Метатеорема.** Пусть верно утверждение (исходная теорема): «Если для игры выполняется условие (#####), то в игре существует равновесие Нэша». Если для игры  $G(S_i, u_i)_{i=1}^N$  выполняется условие сильных угроз, а на её безопасных множествах  $Q^{(i)} \subseteq S$  выполняется условие (#####) существования равновесия Нэша, тогда в игре  $G$  существует равновесие в безопасных стратегиях.

**Комментарий.** Мы не можем заранее утверждать, что исходная теорема верна, так как в ее формулировке стоит переменная часть (#####). При одних значениях переменной части это утверждение может быть истинным, при других – ложным. Но так как исходные теоремы подбираются из достоверных источников и эквивалентно приводятся к стандартному виду, можно полагать эти формулировки истинными, то есть доказанными теоремами. Но само утверждение метатеоремы этого вопроса не касается, предполагая лишь как условие, что в качестве исходной теоремы взято верное утверждение. Таким образом, теорема сводит истинность одного утверждения к истинности другого, и поэтому является метатеоремой. Два связываемых метатеоремой утверждения при этом имеют одну и ту же переменную часть (#####).

Для рассмотренного выше примера полученная при помощи метатеоремы теорема существования РБС будет формулироваться так:

**Теорема существования РБС.** «Если для игры  $G(S_i, u_i)_{i=1}^N$  выполняется условие сильных угроз, а на её безопасных множествах  $Q^{(i)} \subseteq S$  выполняется условие  $\forall i, \forall s_{-i}, \exists! BR_i(s_{-i})$ , функции  $BR_i(s_{-i})$  непрерывны по  $s_{-i}$ , тогда в игре  $G$  существует равновесие в безопасных стратегиях».

### 5. Получение теорем существования РБС из теорем существования РН

Теоремы представлены в виде: исходная теорема, приведенная к стандартному виду; условие (#####); теорема существования РБС.

**Теорема Дебре (1952).** Пусть для всех  $i = 1, \dots, n$  множества  $S_i$  – стягиваемые полиэдры, графики  $\Gamma_i^S = \{(s_{-i}, s_i) \mid s_i \in S_i\}$  замкнуты,  $u_i$  – непрерывные функции из  $\Gamma_i$  в дополненную ось действительных

чисел такие, что  $\varphi_i(s_{-i}) = \max_{s_i \in S_i} u_i(s_{-i}, s_i)$  непрерывна. Если для каждого  $i$  и  $s_{-i}$  множество  $M_{s_{-i}} = \{s_i \in S_i \mid u_i(s_{-i}, s_i) = \varphi_i(s_{-i})\}$  стягиваемо, то существует точка РН.

**Условие (#####):=(#2)=** «в игре  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  для всех  $i = 1, \dots, n$  множества  $S_i$  – стягиваемые полиэдры,  $Q_i(s_{-i})$  – многозначные функции из  $S_{-i}$  в  $S_i$  с замкнутыми графиками  $\Gamma_i$ ,  $u_i$  – непрерывные функции из  $\Gamma_i$  в дополненную ось действительных чисел такие, что  $\varphi_i(s_{-i}) = \max_{s_i \in Q_i(s_{-i})} u_i(s_{-i}, s_i)$  непрерывна. Если для каждого  $i$  и  $s_{-i}$  множество  $M_{s_{-i}} = \{s_i \in Q_i(s_{-i}) \mid u_i(s_{-i}, s_i) = \varphi_i(s_{-i})\}$  стягиваемо».

**Теорема существования РБС по Дебре.** Пусть для всех  $i = 1, \dots, n$  множества  $S_i$  – стягиваемые полиэдры,  $Q_i(s_{-i})$  – многозначные функции из  $S_{-i}$  в  $S_i$  с замкнутыми графиками  $\Gamma_i$ ,  $u_i$  – непрерывные функции из  $\Gamma_i$  в дополненную ось действительных чисел такие, что  $\varphi_i(s_{-i}) = \max_{s_i \in Q_i(s_{-i})} u_i(s_{-i}, s_i)$  непрерывна. Если для каждого  $i$  и  $s_{-i}$  множество  $M_{s_{-i}} = \{s_i \in Q_i(s_{-i}) \mid u_i(s_{-i}, s_i) = \varphi_i(s_{-i})\}$  стягиваемо, то существует точка РБС.

**Теорема Рени (1999).** Если игра  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, квазивогнута и гарантирует лучший ответ, то она обладает равновесием Нэша в чистых стратегиях.

**Условие (#####):=(#3)=** «игра  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, квазивогнута и гарантирует лучший ответ».

**Теорема существования РБС по Рени.** Предположим, игра  $G(S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, квазивогнута на безопасных стратегиях, все множества безопасных стратегий в ней являются выпуклыми компактными множествами, гарантирует лучший ответ в безопасных стратегиях, с сильными угрозами, тогда в игре  $G$  существует РБС.

**Следствие Рени (1999).** Если игра  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, квазивогнута, взаимно верхне полунепрерывна и гарантирует выигрыш, то в ней имеется равновесие Нэша в чистых стратегиях.

**Условие (#####):=(#4)=** «игра  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, взаимно верхне полунепрерывна и гарантирует выигрыш».

**Теорема существования РБС по следствию Рени.** Предположим, игра  $G(S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, квазивогнута на безопасных стратегиях, все множества безопасных стратегий в ней являются выпуклыми компактными множествами, гарантирует выигрыш на безопасных стратегиях, взаимно-верхне-полунепрерывна в безопасных стратегиях, с сильными угрозами, тогда в игре  $G$  существует РБС.

**Теорема Бика (2009).** Если в компактной игре  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  для каждого  $(s^*, u^*) \in \overline{\Gamma(u)}$  такого, что  $s^*$  не является равновесием Нэша, некоторый игрок  $i$  может гарантировать выигрыш строго выше  $u_i^* + \limsup_{s' \rightarrow s^*} (\tilde{u}_i(s') - u_i(s'))$ , то в  $G$  существует равновесие Нэша в чистых стратегиях.

**Условие (#####):=(#5)=** «игра  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  компактна, для каждого  $(s^*, u^*) \in \overline{\Gamma(u)}$  такого, что  $s^*$  не является равновесием Нэша, некоторый игрок  $i$  может гарантировать выигрыш строго выше  $u_i^* + \limsup_{s' \rightarrow s^*} (\tilde{u}_i(s') - u_i(s'))$ ».

**Теорема существования РБС по Бикю.** Если в компактной игре  $G = (S_i, u_i)_{i=1}^N$  для каждого  $(s^*, u^*) \in \overline{\Gamma(u)}$  такого, что  $s^*$  не является РБС, некоторый игрок  $i$  может гарантировать выигрыш строго выше  $u_i^* + \limsup_{s' \rightarrow s^*} (\tilde{v}_i(s') - u_i(s'))$ , то в  $G$  существует РБС.

## 6. Заключение

Целью доклада является продемонстрировать метод конструирования теорем существования РБС из имеющихся в литературе теорем существования равновесий Нэша (в чистых стратегиях). Материал подается максимально формально и стандартизировано, особенно в последнем разделе. Во многих случаях такого формального применения метатеоремы оказывается недостаточно для получения рабочих теорем, применимых к задачам. В таком случае приходится дорабатывать полученные утверждения, чтобы они стали достаточно сильными для прикладного применения. Тем не менее, такой стандартный результат дает прочный фундамент для окончательной доработки в каждом конкретном случае.

## Литература

1. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука. 1977.– 255 с.
2. Исакаев М.Б. Равновесие в безопасных стратегиях. // Автоматика и телемеханика. 2005. №3. С. 139–153.
3. Debreu G. A social equilibrium existence theorem. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1952. 38 (10), p. 886–893.
4. Reny P. J. On the existence of pure and mixed strategy Nash equilibria in discontinuous games. Econometrica, 1999, 67 (5), p.1029–1056.
5. Bich, P. Existence of pure Nash equilibria in discontinuous and non quasiconcave games // Int. J. Game Theory 2009, 38, 395-410.

# УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Калянов Г.Н.

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

kalyanov@ipu.ru

*Аннотация.* Рассматривается процессный аспект человеческой деятельности. Предлагается классификация процессов, унифицированная модель процесса, приводится пример комплексного процесса и его формализованной модели. Формулируются основные задачи общей теории процессов.

*Ключевые слова:* методология деятельности, комплексный процесс, классификатор, структурная модель процесса, функциональная схема.

## Введение

В последние годы в рамках междисциплинарных исследований сформировалось новое направление, связанное с унификацией и формализацией различных видов человеческой деятельности. Данное направление, посвященное разработке единой теории деятельности в виде совокупности общих и универсальных моделей, представлено трудами А.М. Новикова и Д.А. Новикова и их коллег [1-5]. Соответствующее учение (теория) об общих закономерностях организации деятельности и управления ею получило название методологии деятельности.

В перечисленных работах неоднократно отмечается процессная структура деятельности как неотъемлемая ее часть (наряду с логической, причинно-следственной и др. частями).

В настоящее время вопросам исследования процессов различных видов человеческой деятельности посвящено значительное число работ. Однако большинство авторов уделяют свое внимание лишь двум категориям процессов – вычислительным [6] и организационно-управляющим (или бизнес-процессам) [7, 8]. Для данных категорий процессов были разработаны соответствующие теории, для других же категорий процессов в отдельных случаях имеются лишь разрозненные модели и методы их исследований. При этом существующие подходы и полученные в их рамках результаты не позволяют единообразно описывать процессы создания и поведения современных сложных систем. Поэтому актуальной является как задача создания соответствующих теорий для других категорий процессов, так и создание общей теории процессов человеческой деятельности, интегрирующей и обобщающей перечисленные частные теории.

## 1. Основы классификации процессов

В отличие от приведенной в [1] классификации деятельности по целевой направленности (а именно, игра-учение-труд), будем использовать в качестве основания целевой объект деятельности. В таблице 1 приведены виды деятельности в соответствии с их целевым объектом.

Таблица 1. Виды человеческой деятельности.

Вид деятельности	Целевой объект
игровая	игра
образовательная	человек (образование)
практическая	товар, услуга
научная	научный результат
художественная	произведение искусства
философская	научный результат
религиозная	человек (вера)
управляющая	человеческая деятельность

В работе [9] предложена классификация процессов человеческой деятельности, в основе которой лежит их разбиение на следующие четыре группы:

- Процессы элементарной деятельности (общие для всех видов деятельности) в соответствии с методологией элементарной деятельности, а именно, процессы жизненного цикла (ЖЦ) целевого объекта (ЦО) в соответствии со стадиями ЖЦ: концепция, проектирование, производство (создание), применение, поддержка, утилизация.
- Процессы человеческой деятельности различных видов в соответствии с частными методологиями деятельности (см. Таблицу 1), отражающие специфику каждой из деятельностей в рамках стадий ЖЦ ЦО.
- Поддерживающие (интегрирующие) процессы, пронизывающие вышеописанные процессы по горизонтали и связывающие их функциональные компоненты: организационно-управляющие (бизнес-процессы), информационные, вычислительные. Дальнейшая детализация таких процессов



также является многоуровневой. В частности, организационно-управляющие процессы могут быть разделены на основные, сопутствующие, вспомогательные и обеспечивающие процессы, в свою очередь детализированные в соответствии с функциональной иерархией предприятия или организации. Аналогично, информационные процессы (процессы, связанные с изменением информации или действиями с использованием информации) могут быть разделены на процессы сбора, поиска, обработки, представления, хранения, передачи и защиты информации.

- Характеристические свойства процессов, которыми может обладать любой из процессов, представленных выше, в частности: автоматизированность (ручной, автоматизированный, автоматический), параллелизм (синхронный, асинхронный, конвейерный, последовательный), состав исполнителей (индивидуальный, групповой, многорольевой), характер (дискретный, непрерывный) и др.

Необходимо сказать, что характеристические свойства процессов не являются основанием для классификации, они лишь вводят дополнительные требования к языкам описания процессов. Например, для описания асинхронных параллельных процессов необходимо наличие в языке средств синхронизации ветвей и т.п.

Отметим, что процессы ЖЦ систем (в рамках системной и программной инженерии как наиболее развитых в части ЖЦ дисциплин) вписываются в данную схему. В частности, приведенные в [10] технические процессы являются детализацией всех процессов элементарной деятельности в рамках конкретной практической деятельности (разработки программных систем). Процессы соглашения, процессы организационного обеспечения проектов и процессы проекта (за исключением процесса управления информацией) являются организационно-управляющими процессами, а процесс управления информацией – совокупностью информационных процессов.

Процессы перечисленных видов по сути являются элементарными. В реальной жизни мы сталкиваемся с комплексными процессами, интегрирующими:

- один из процессов элементарной деятельности конкретного вида;
- один из организационно-управляющих процессов, тип которого соответствует выбранному процессу элементарной деятельности конкретного вида;
- множество информационных процессов, связывающих функции выбранного процесса элементарной деятельности конкретного вида;
- набор вычислительных процессов, детализирующих некоторые функции выбранного процесса элементарной деятельности конкретного вида.

Пример комплексного процесса приведен на рис. 1, где изображен процесс ремонта автотранспортного средства. Изображенный сплошными линиями фрагмент в соответствии с процессами ЖЦ является процессом поддержки, а в соответствии с видами деятельности относится к процессам практической деятельности. Дальнейшая функциональная детализация позволяет соотнести его с разделом 45 ОКВЭД «Торговля оптовая и розничная автотранспортными средствами и мотоциклами и их ремонт» и, далее, с подразделом 45.2 («Техническое обслуживание и ремонт автотранспортных средств»), включающем (в соответствии с подпунктами 45.20.0 - 45.20.5) следующие виды работ:

- ремонт транспортных средств, включая: механический ремонт, ремонт электрических систем, ремонт системы впрыскивания, текущее техническое обслуживание транспортных средств, ремонт кузова, ремонт ходовой части, мойку и полировку, покраску и рисование, ремонт лобового стекла и окон, ремонт автомобильных кресел;
- шиномонтаж и все виды связанных с ним работ;
- антикоррозийную обработку;
- установку дополнительного оборудования (сигнализация, радиоаппаратура, дополнительные фары и т.п.), запасных частей и принадлежностей, не относящихся непосредственно к производственному процессу;
- предпродажную подготовку;
- техническую помощь на дорогах;
- транспортирование неисправных автотранспортных средств к месту их ремонта или стоянки.

Изображенный штриховыми линиями фрагмент является организационно-управляющим процессом, при этом его тип может варьироваться в зависимости от вида предприятия, где он реализован. Например, для сервисного центра он является основным, а для занимающейся перевозками автобазы - вспомогательным.

Фрагменты, изображающие функции, связанные с накопителями данных, представляют собой информационные процессы, типы которых зависят от способа изменения или использования информации. Наконец, фрагмент «Расчет стоимости ремонта» может являться вычислительным процессом в случае его представления в виде формулы, вычисляющей требуемый результат.

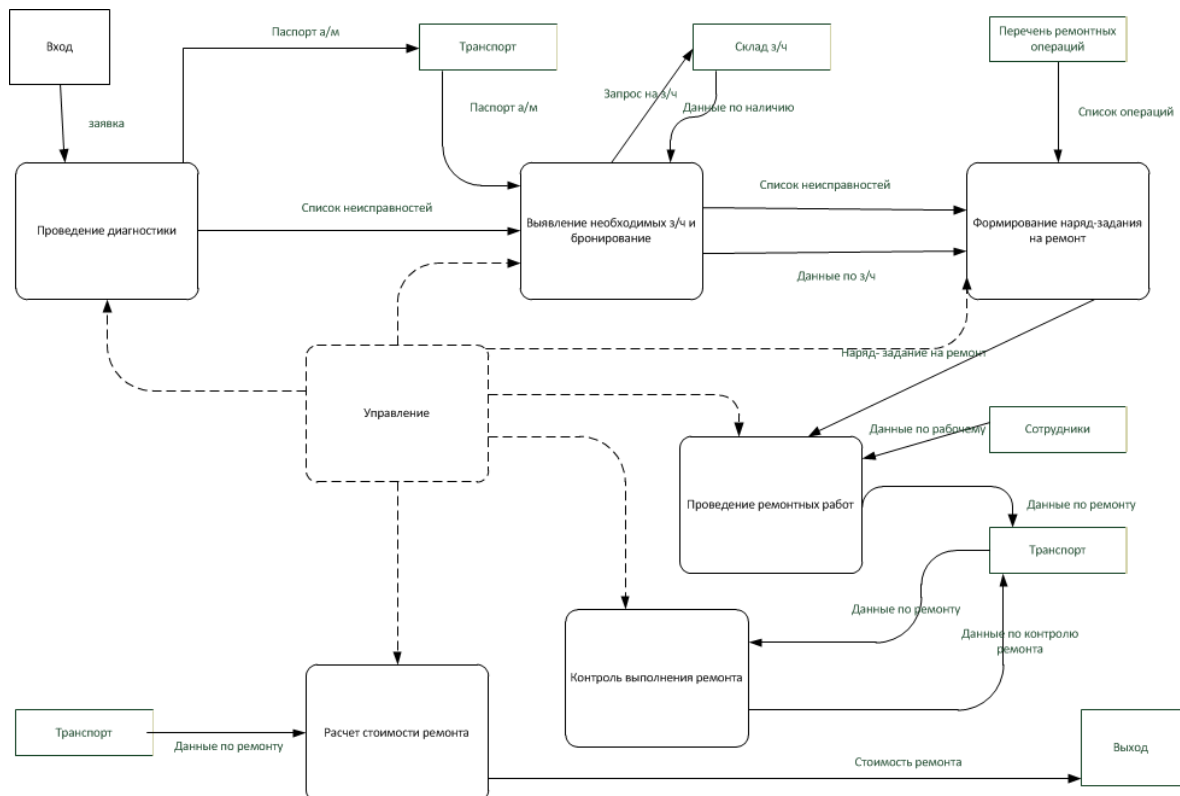


Рис. 1. Процесс ремонта автотранспортного средства

## 2. Модель процесса

Математическая модель процессов должна удовлетворять обычным для моделей требованиям, которые в данном случае выглядят следующим образом:

- модель должна позволять изучать свойства достаточно широких классов процессов, а не их конкретных представителей;
- модель должна сохранять все интересующие исследователя свойства и особенности рассматриваемого класса процессов;
- структура модели должна изобразительно быть подобна структуре процесса.

Для исследования процесса необходимы модели следующих трех типов:

- функциональная, описывающая состав и структуру входящих в него функций, их взаимосвязи и взаимодействия (т.е. иллюстрирующая выполняемые функции) – для этой цели будем использовать диалект диаграммы потоков управления [7], с последующим переходом в функциональную схему,
- информационная, описывающая состав и структуру входящих данных (информационных потоков), а также отношения между данными – для этой цели будем использовать классическую диаграмму «сущность-связь» в нотации Баркера,
- поведенческая, демонстрирующая динамику целевого объекта по времени – для этой цели будем использовать диаграмму переходов состояний.

Функциональная схема процесса является простой формализацией диаграммы потоков данных и представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются функциональные объекты диаграммы, а дуги отображают движение информационных потоков между функциями. Отметим, что в схеме отсутствуют связи по управлению. На рис. 2 приведен пример простейшей диаграммы потоков данных, а на рис. 3 – ее функциональная схема.

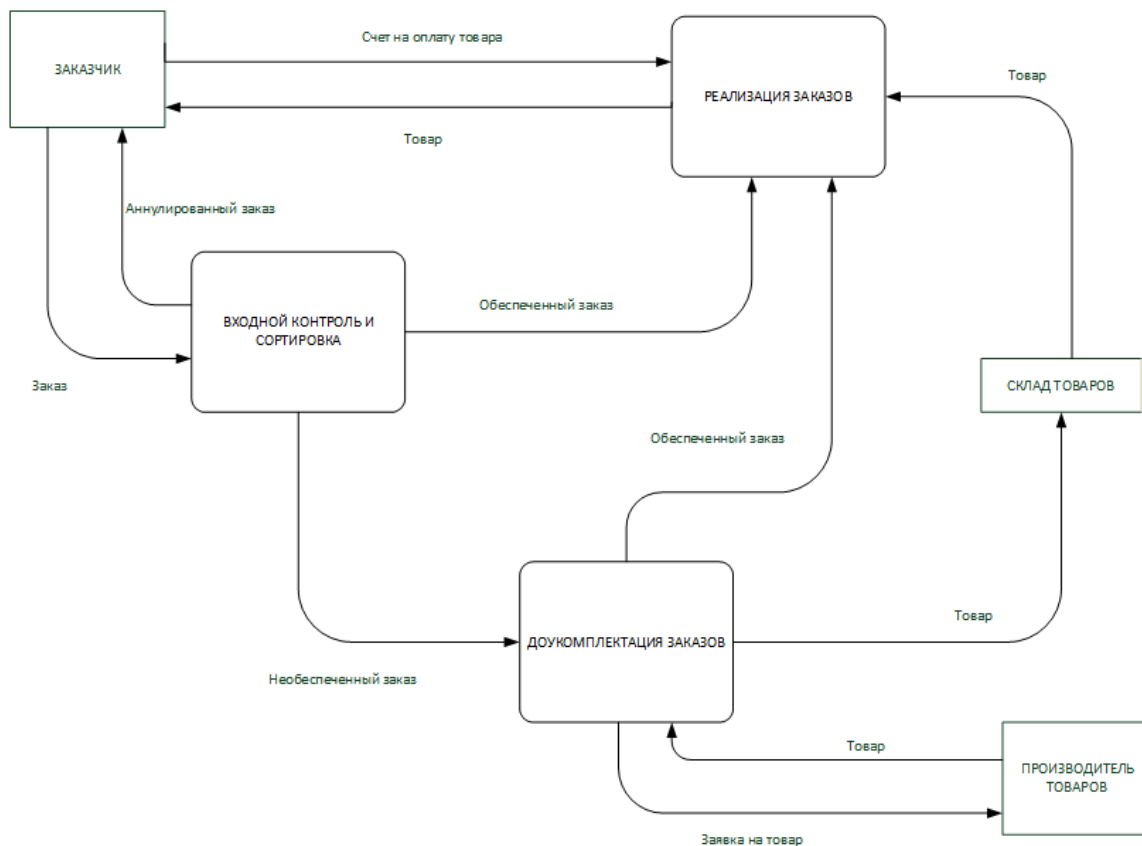


Рис 2. Пример диаграммы потоков данных.

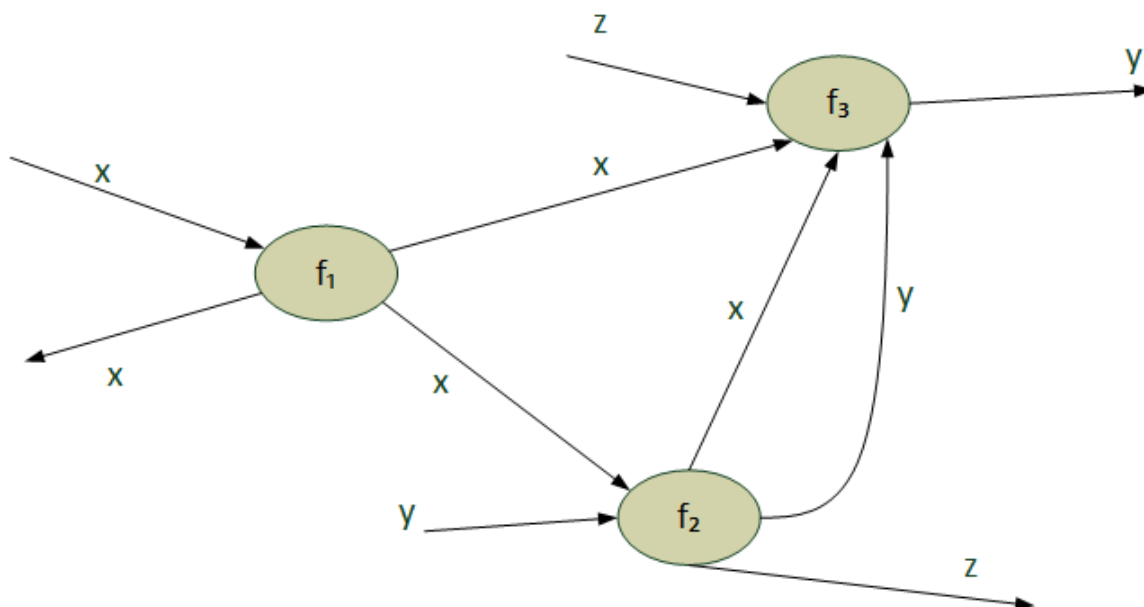


Рис 3. Функциональная схема диаграммы.

В данной функциональной схеме информационные объекты X, Y, Z описывают потоки данных диаграммы, изображенной на рис. 2, а именно, заказы, товары и счета/заявки, соответственно, и представляют собой множества кортежей вида:

$X = \{x_1 = \text{наименование товара}, x_2 = \text{количество товара}, \dots, x_k\}$

$Y = \{y_1 = \text{наименование товара}, y_2 = \text{количество товара}, \dots, y_n\}$

$Z = \{z_1 = \text{наименование товара}, z_2 = \text{количество товара}, \dots, z_m\}$

Другими словами, информационная модель может быть описана в терминах реляционной алгебры и для данного примера представляет собой совокупность трех отношений ЗАКАЗ, ТОВАР и СЧЕТ, первое из которых имеет связь со вторым по типу один-ко-многим, а с третьим - по типу один-к-одному. Эти отношения представляются следующим образом:

ЗАКАЗ (номер заказа, дата заказа)

ТОВАР (номер заказа, дата заказа, наименование (код) товара, количество товара, цена товара)

СЧЕТ (номер счета, номер заказа, дата заказа, наименование товара, сумма к оплате)

Управление задается с помощью диаграммы переходов состояний. При этом рассматриваются состояния объекта ЗАКАЗ (рис. 4).

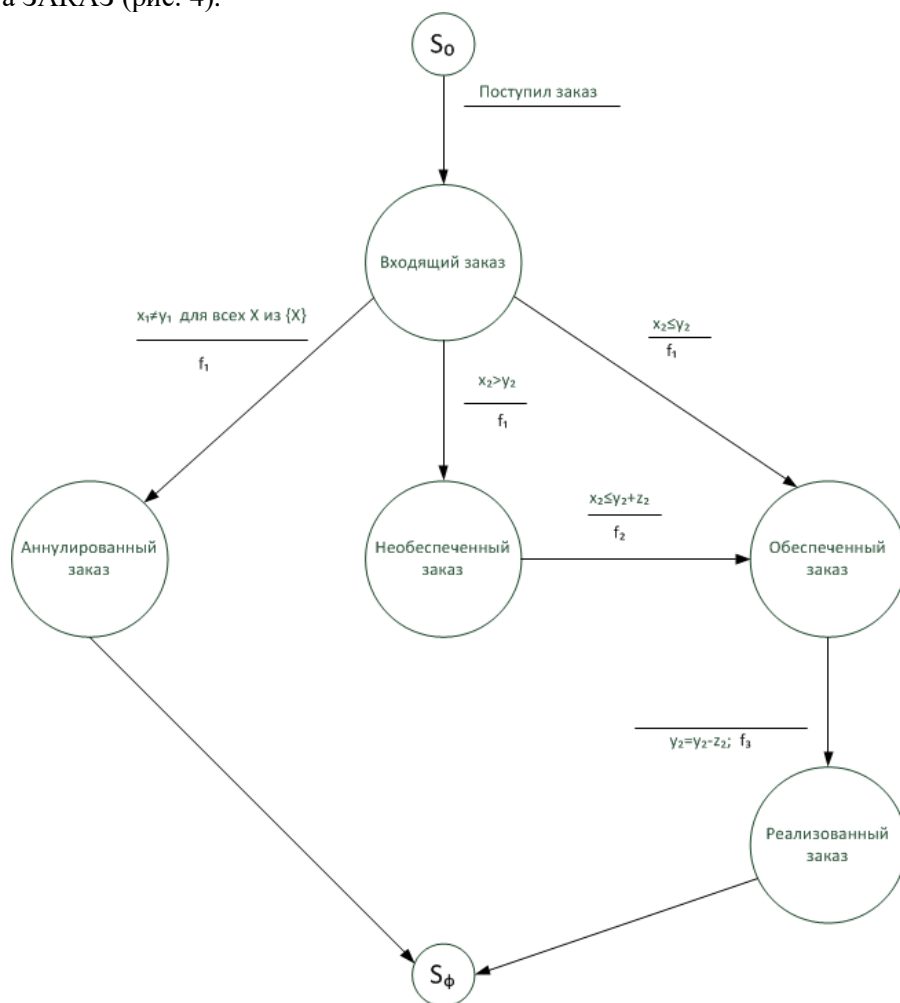


Рис 4. Диаграмма переходов состояний.

Для удобства переведем эту диаграмму переходов состояний в соответствующую матрицу (таблица 1).

Таблица 1. Матрица переходов состояний

Текущее состояние	Условие	Действие	Следующее состояние
$S_0$	Поступил заказ	-	Входящий заказ
Входящий заказ	$x_1 \neq y_1$ для всех $X$ из $\{X\}$	$f_1$	Аннулированный заказ
Входящий заказ	$x_2 > y_2$	$f_1$	Необеспеченный заказ
Входящий заказ	$x_2 \leq y_2$	$f_1$	Обеспеченный заказ
Аннулированный заказ	-	-	$S_\phi$
Необеспеченный заказ	$x_2 \leq y_2 + z_2$	$f_2$	Обеспеченный заказ
Обеспеченный заказ	-	$y_2 = y_2 - z_2; f_3$	Реализованный заказ
Реализованный заказ	-	-	$S_\phi$

## 5. Заключение

В заключение отметим, что предложенная модель является частным случаем предложенной в [8] комплексной модели бизнес-процесса, и, следовательно, обеспечивает систематизированный базис для решения таких задач как:

- моделирование процессов,
- инжиниринг (проектирование) и реинжиниринг процессов, а также рассмотрение альтернативных решений вышеназванных задач,
- анализ и верификация процессов.

## Литература

1. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология. М.: - СИНТЕГ, 2007. – 668 с.
2. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология: словарь системы основных понятий. – М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2015. – 208 с.
3. *Новиков Д.А.* Методология управления. – М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2016. – 128 с.
4. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология научного исследования. – М.: Ленанд/URSS, 2017. – 272 с.
5. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Методология комплексной деятельности. – М.: URSS, 2018. – 320 с.
6. *Мионов А.М.* Теория процессов. – Переславль-Залесский: Университет г.Переславля, 2008. – 345 с.
7. *Калянов Г.Н.* Теория бизнес-процессов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2023. – 296 с.
8. *Калянов Г.Н.* Теория и практика реорганизации бизнес-процессов. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 212 с.
9. *Калянов Г.Н.* Принципы классификации процессов человеческой деятельности // Сборник трудов XIV Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2024. – М.: ИПУ РАН, 2024 (в печати).
10. *Батоврин В.К.* Системная и программная инженерия. Словарь-справочник – М.: ДМК Пресс, 2010, – 280 с.

# ПРОТИВОЗАТРАТНЫЙ МЕХАНИЗМ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПОЧКЕ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кашенков А.Р.

Вологодский государственный университет, Вологда, Россия  
alex27k@mail.ru

*Аннотация.* В работе исследованы на противозатратность две модели производственных цепочек, состоящих из двух активных элементов. Для первого элемента в цепочке функция затрат имеет линейный вид. Для второго элемента, выпускающего готовую продукцию, рассмотрены две модели зависимости затрат от объема выпуска.

*Ключевые слова:* противозатратный механизм, условия противозатратности, последовательная цепочка активных элементов, оптимальный выпуск.

## Введение

Противозатратными называются механизмы управления, которые побуждают каждого агента повышать эффективность своей деятельности с минимальными затратами [1]. Противозатратные механизмы управления разработаны в рамках теории активных систем как для монопольных производителей [1-5], так и для применения в системах внутрифирменного управления [6]. В данной работе рассматривается противозатратный механизм для производственной цепочки, состоящей из двух цехов (активных элементов). Предлагается противозатратный механизм для первого элемента цепочки и механизм открытого управления для второго.

## 1. Противозатратный механизм ценообразования

Пусть  $c$  – себестоимость единицы продукции,  $L$  – максимальная (лимитная) цена продукции. В качестве показателя эффективности можно взять  $\Theta = \frac{L}{c}$ . Цена продукта  $\Pi = c + \pi = (1 + \rho)c$ , где  $\pi = \rho c$  – прибыль,  $\rho$  – рентабельность. Соотношения записаны для единицы продукции, но если считать количество продукции постоянным, то они справедливы для любого объема выпуска.

Противозатратность механизма ценообразования для монопольного производителя может быть достигнута за счет введения зависимости рентабельности от эффективности. Примем, что интерес производителя определяется стремлением к максимизации прибыли.

Механизм ценообразования будет противозатратным, если при уменьшении затрат (себестоимости) прибыль растет, а цена продукта уменьшается.

Поскольку при уменьшении себестоимости растет эффективность  $\Theta$ , то для обеспечения противозатратности естественно увеличивать  $\rho$  вместе с ростом эффективности  $\Theta$ . Будем предполагать, что  $\rho(\Theta)$  – возрастающая дифференцируемая функция. В формальной записи требования противозатратности имеют вид:

$$\frac{\partial \pi}{\partial c} < 0, \frac{\partial \Pi}{\partial c} > 0. \quad (1)$$

Из (1) получаем условия, которым должна удовлетворять  $\rho(\Theta)$ :

$$0 < \Theta \frac{d\rho}{d\Theta} - \rho(\Theta) < 1. \quad (2)$$

Множество значений эффективности, для которых выполняются условия (2), называется множеством противозатратности механизма по прибыли  $G$ .

Функция  $h(\Theta) = \Theta \frac{d\rho}{d\Theta} - \rho(\Theta)$  называется характеристической функцией множества противозатратности. Функция  $h(\Theta)$  на множестве  $G$  принимает значения из интервала  $(0; 1)$ .

Пусть  $\rho(\Theta) = k(\Theta - 1)$ . Тогда

$$\Pi = (1 + k(\Theta - 1))c = \left(1 + k \frac{L}{c} - k\right)c = c + k(L - c).$$

В этом случае  $h(\Theta) = k$ , то есть коэффициент  $k$  должен удовлетворять условию  $0 < k < 1$ . Для обеспечения заинтересованности агента обычно берется  $k_{min} \leq k \leq 1$ .

Такой механизм ценообразования целесообразно использовать для цеха, который поставляет комплектующие подразделению (агенту), выпускающему готовую продукцию.

## 2. Модель цепочки активных элементов

Рассматривается модель предприятия, которая представляет собой производственную цепочку, состоящую из двух активных элементов (цехов). Продукция первого цеха используется для выпуска продукции вторым цехом. Себестоимость производства единицы продукции первого цеха  $c_1$ ,  $\Pi_1$  – цена единицы продукции первого цеха. Для обеспечения противозатратности она определяется по формуле

$\Pi_1 = c_1 + k(L - c_1)$ , где  $L$  - максимальная (лимитная) цена продукции первого цеха,  $k$  – коэффициент,  $k_{min} \leq k \leq 1$ .

Пусть  $x$  – выпуск первого цеха,  $ax$  – выпуск второго цеха. Себестоимость производства  $ax$  единиц продукции второго цеха  $C_2$  зависит от объема выпуска. В работе рассматриваются два вида таких зависимостей. Цена единицы готовой продукции  $P$ . Прибыль второго цеха

$$\pi_2 = Pax - \Pi_1 x - C_2. \quad (3)$$

Общая прибыль предприятия (центра) определяется формулой:

$$\pi_0 = Pax - c_1 x - C_2. \quad (4)$$

Задача состоит в определении оптимального объема выпуска, обеспечивающего максимизацию прибыли центра (предприятия) и второго цеха при значении коэффициента  $k$  обеспечивающего противозатратность механизма для первого цеха и цепочки в целом.

### 3. Решение задачи для двух видов зависимости себестоимости от выпуска

#### 3.1. Первая модель

Зависимость себестоимости продукции от выпуска определяется формулой:

$$C_2 = \frac{1}{2r} a^2 x^2. \quad (5)$$

Прибыль второго цеха в этом случае будет равна

$$\pi_2 = Pax - \Pi_1 x - \frac{1}{2r} a^2 x^2. \quad (6)$$

Максимум прибыли второго цеха достигается при

$$x_{opt2} = \frac{(Pa - \Pi_1)r}{a^2}. \quad (7)$$

Общая прибыль предприятия в этом случае будет

$$\pi_0 = Pax - c_1 x - \frac{1}{2r} a^2 x^2. \quad (8)$$

Наибольшее значение прибыли достигается при

$$x_{opt0} = \frac{(Pa - c_1)r}{a^2}. \quad (9)$$

Приравнивая  $x_{opt2}$  и  $x_{opt0}$ , получаем, что они совпадают при  $\Pi_1 = c_1$ .

Таким образом, наиболее близким к оптимальному выпуск будет при значении коэффициента  $k = k_{min}$ , обеспечивающим противозатратность механизма для первого цеха.

#### 3.2. Вторая модель

Рассмотрим случай, когда затраты на выпуск  $ax$  единиц продукции определяются формулой Кобба-Дугласа:

$$C_2 = \frac{1}{\alpha} r^{1-\alpha} (ax)^\alpha. \quad (10)$$

В этом случае прибыль второго цеха будет

$$\pi_2 = Pax - \Pi_1 x - \frac{1}{\alpha} r^{1-\alpha} (ax)^\alpha. \quad (11)$$

Максимум прибыли второго достигается при

$$x_{opt2} = \frac{\alpha^{-1} \sqrt{\frac{Pa - \Pi_1}{r^{1-\alpha} a^2}}}{\sqrt{r^{1-\alpha} a^2}}. \quad (12)$$

Общая прибыль предприятия в этом случае

$$\pi_0 = Pax - c_1 x - \frac{1}{\alpha} r^{1-\alpha} (ax)^\alpha. \quad (13)$$

Максимум прибыли предприятия достигается при

$$x_{opt0} = \frac{\alpha^{-1} \sqrt{\frac{Pa - c_1}{r^{1-\alpha} a^2}}}{\sqrt{r^{1-\alpha} a^2}}. \quad (14)$$

Равенство оптимального значения выпуска второго цеха и предприятия в целом достигается при  $\Pi_1 = c_1$ .

Для обеспечения противозатратности для цепочки в целом берем  $\Pi_1 = c_1 + k_{min}(L - c_1)$ , то есть в качестве коэффициента  $k$  берем  $k_{min}$ .

### 4. Заключение

В данной работе проанализированы две модели производственных цепочек, состоящих из двух активных элементов. Для первого элемента в цепочке функция затрат имеет линейный вид. Для второго элемента, выпускающего готовую продукцию, исследованы две модели зависимости затрат от объема выпуска. В дальнейшем представляется целесообразным исследовать на противозатратность более сложные производственные цепочки активных элементов, имеющих различные виды функции затрат.

## Литература

1. *Кашенков А.Р.* Моделирование противозатратных механизмов управления хозяйственными объектам: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.Р. Кашенков. – Москва, 1992. – 18 с.
2. *Бурков, В. Н.* Противозатратные механизмы управления научными исследованиями и разработками / В. Н. Бурков, А. Р. Кашенков // Совершенствование организационно-экономического механизма управления деятельностью научных организаций: материалы конференции. – М.: МДНТП, 1988. – С. 49-53.
3. *Новиков, Д. А.* Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – Москва: Московский психолого-социальный университет, 2005. – 584 с.
4. *Бурков, В. Н.* Противозатратный механизм ценообразования в системе "центр - агенты монополисты" / В. Н. Бурков, М. Х. Дорри, А. В. Щепкин, А. Р. Кашенков // Экономика и менеджмент систем управления. – 2017. – № 4-1(26). – С. 164-172.
5. *Бурков, В. Н.* Противозатратные механизмы ценообразования при ограничении на сумму цен / В. Н. Бурков, А. В. Щепкин // Проблемы управления. – 2021. – № 3. – С. 42-49.
6. *Вилкова, Н. Н.* Противозатратный механизм внутрифирменного ценообразования / Н. Н. Вилкова, А. Р. Кашенков, М. Н. Трапезова // Управление большими системами: сборник трудов. – 2000. – № 2. – С. 16-18.



# ТЕОРИЯ ОБЩИХ СИСТЕМ И ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ

Лещенко В. В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени  
Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева», Москва,  
Россия  
leschenko@rambler.ru*

*Аннотация. В работе отмечена актуальность системных исследований и необходимость консолидации усилий в этом направлении на примере теории общих систем и теории активных систем. Дано краткое представление теории общих систем, алгебры общих систем и определение понятия система.*

*Ключевые слова: теория общих систем, теории активных систем, алгебра общих систем, информационная модель мировоззрения, определение системы.*

## Введение

Актуальность системных исследований приобрела особую остроту для России в период социально-политической и социально-экономической трансформации на рубеже второго и третьего тысячелетия. Человечество стремительно расширяет информационную сферу планеты Земля на основе развития техносферы программных и аппаратных средств телекоммуникаций. Расширение плюрализма, «демократизации», либерализации общества распространилось и на научную сферу. В России проводится немало научных, научно-практических и практических конференций, семинаров, круглых столов и различных аналогичных мероприятий, где формулируются различные проблемы и делаются попытки предложить их решение. Но, судя по публикациям материалов этих мероприятий, разнообразных представлений об одном и том же предмете у их участников становится все больше и больше.

Таким образом, наблюдается стремительный рост различных представлений об одном и том же предмете. Порождается разнообразие, в котором необходимо ориентироваться, чтобы использовать всё конструктивное в нём для прогрессивного развития общества. Создавшееся на сегодняшний день положение требует поиска дальнейшего пути прогрессивного развития Человечества.

В настоящей работе кратко представлено построение моделей общих систем для отображения мировоззрения общества путем использования теории и методологии общих систем, как возможный путь выхода из сложившегося положения.

В условиях расширения разнообразия взглядов, научных теорий, направлений исследования целесообразно искать пути консолидации поиска решений возникающих проблем усилий в соответствии с исходной методологией первоисточника теории активных систем, описанного в работе авторов [1].

## 1. Теория общих систем

Наряду с множеством вариантов представлений понятия «система», описанных в различной литературе к настоящему времени, для данного исследования в избранном направлении автор сформулировал следующее: системой называется модель какого-либо объекта, явления или процесса, состоящая из множества элементов – категорий, понятий или определений, представленных в виде образов, и взаимосвязей или отношений между ними [2].

К настоящему времени известны различные версии общих теорий систем, в том числе и названные именами авторов, предложивших их. Прделана большая работа по исследованию и описанию достижений в этом направлении [3]. Проведенный В.Н. Садовским обзор позволил ему выделить, например, два основных представления в области теории систем. Первое – общая теория систем. Второе – обобщенная теория систем. Мною приведен отбор именно таких разновидностей теорий систем из соображений формирования представления о теории общих систем в сравнении с имеющимися.

Общая теория систем предполагает ее применимость во всех случаях системного представления, когда в рассматриваемой области можно выделить элементы и их связи друг с другом. Другими словами, она представляет собой всеобщую теорию систем [4]. Предполагается при этом, что формальный аппарат такой теории должен быть применим к различного рода системам.

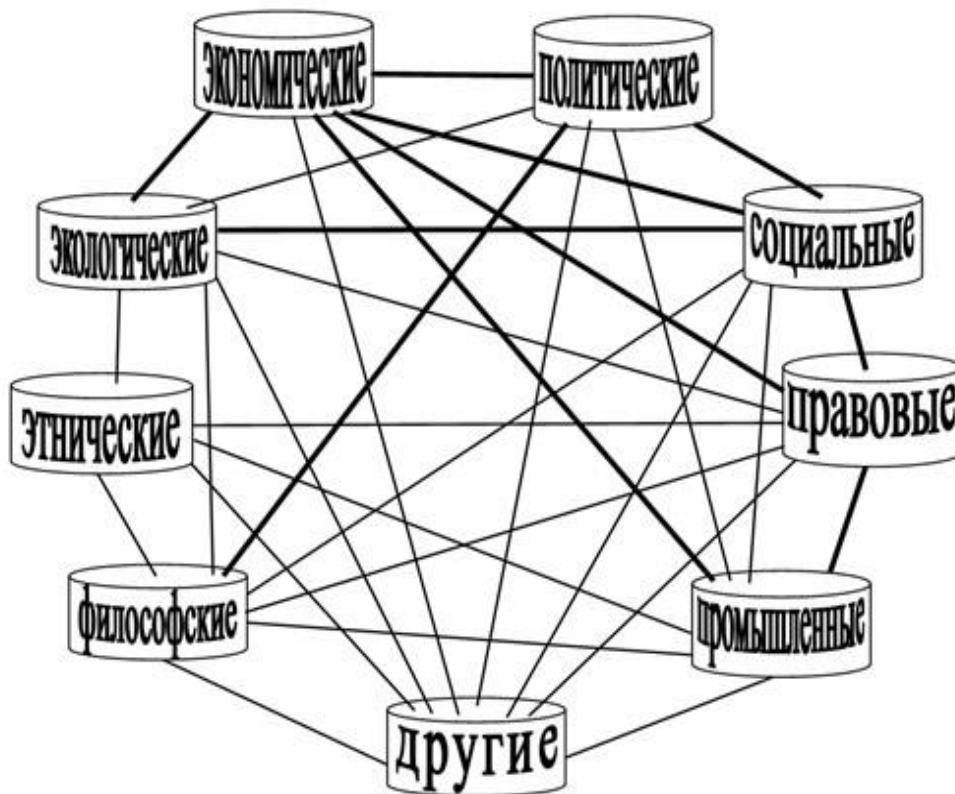
В другом случае, в противоположность предыдущему представлению, полагают, что теория систем не может быть общей. Взамен используют понятие обобщенной теории систем, когда предлагается ряд теорий, описывающих системы различного рода или типа. Количество таких теорий может быть бесконечно большим.

В отличие от общей и обобщенной теорий систем предлагается третье представление – теория общих систем (common system theory), отличие которой от общей и обобщенной теорий систем состоит в следующем.

Теория общих систем рассматривает системы, включающие в себя доминирующие взаимосвязанные разнородные системы. Она предполагает, что не может быть всеобщей системы или суперсистемы,

применимой во всех случаях системных представлений объектов и описывающей все. С другой стороны, теория общих систем предполагает возможность преобразования существующих моделей разнородных систем в тот вид, при котором из нескольких таких систем, связанных между собой, можно было бы в рамках определенных граничных условий, например, пространственных и временных, создать модель, отображающую какую-либо сторону мироздания. В идеале должен существовать набор моделей разнородных систем, из которых согласно теории общих систем можно было бы, выбрав доминирующие, создавать модели, отображающие восприятие человечеством мироздания в пределах существующих знаний. Под доминирующими системами различного рода понимаются те из них, которые достаточны в создаваемой модели для адекватного отображения ею фрагмента или стороны мироздания и наблюдаемых нами процессов. Сама же модель в таком случае представляет собой общую систему.

Иллюстрация общей системы, представляющей собой взаимосвязанные разнокачественные системы, приведена на рис. 1. Модель общей системы представляет собой взаимосвязанные модели доминирующих разнородных систем.



*Рис. 1. Изображение модели общих систем, состоящей из разнородных систем и взаимосвязей между ними*

В примере, приведенном на рисунке, доминирующими являются: политические, экономические, социальные, экологические, правовые, этнические, промышленные и философские системы, взаимосвязь которых обозначена толстыми стрелками. Присутствуют здесь и остальные разнородные системы с взаимосвязями, обозначенными тонкими стрелками, но они не являются доминирующими и поэтому в модель общей системы в данном примере не входят.

Каждая из разнородных систем состоит из семейства однородных систем. Экономические системы представлены множеством моделей экономики различных стран или различных отраслей промышленности. Экологические системы состоят из различных типов систем такого рода, представленных в виде моделей, отображающих взаимоотношения различных организмов, и человека в том числе, с окружающей средой.

Причем каждая из этих моделей зачастую отображает определенный конкретный тип взаимоотношений. Подобным образом можно было бы продолжить иллюстрацию остальных семейств однородных систем.

При построении модели, отображающей общую систему, необходимо определить ее граничные условия, в рамках которых функционируют модели составляющих их разнородных систем, которые оказывают доминирующее влияние на функционирование общей системы.

Математическое представление модели в теории общих систем строится на известной «теоретико-множественной трактовке понятия «система». Для математического описания моделей общих систем была предложена алгебра общих систем, которая кратко изложена ниже.

Теория общих систем предназначена для построения информационной модели мировоззрения общества и моделей профессионального мировоззрения.

## **2. Информационная модель мировоззрения общества**

В настоящее время всеобъемлющим мировоззрением не обладает никто: ни президент, ни губернатор, министр или депутат, ни чиновники любых других рангов. Да и никто никогда не сможет вместить в себя всю картину происходящих процессов в стране и, тем более, во всем мире. С помощью же информационной модели мировоззрения общества, реализованной, например, путем использования средств информатики, можно отобразить мировоззрение, которое, конечно, не будет абсолютно полным, но в сотни тысяч раз более объемным, чем это по силам одному человеку. Оно не сможет представить всю информационную сферу планеты, но позволит ориентироваться в ней для получения необходимых знаний для теоретических исследований и практической деятельности людей.

Создаваемая предлагаемым способом информационная модель предназначена для всех, кто причастен к политическому управлению в государстве, в том числе и для тех, кто, принимая участие в голосовании, определяет состав парламента в стране или других представительных органов в различных ее регионах.

На рис. 2 изображена технология формирования информационной модели мировоззрения общества и ее взаимодействия с государственной службой, обществом, научно-исследовательскими институтами и информационными потоками. Из трех слоев информации (средств массовой информации, служебной и закрытой информации) проводится формирование элементов разнородных систем и взаимосвязей между ними. Эту работу проводят исследователи научных институтов и центров.

Здесь понятие институтов имеет более широкое значение, чем просто юридически зарегистрированные организации. Полученные таким образом элементы и взаимосвязи между ними используют для построения модели общих систем. Именно она в свою очередь служит обществу, государственной службе и исследователям для восприятия окружающего мира и жизни общества в нем. Последние дают информацию об отражении моделью происходящих процессов и адекватности его картине мира и общества.

Стратегическая цель применения информационной модели мировоззрения общества состоит в том, чтобы создаваемые модели играли роль «идеального зеркала» в организации управления обществом. Полезность выполняемой работы видится в использовании такого идеального зеркала парламентариями в законодательном процессе, правительством, системой государственной службы и иными исполнительными властными структурами для управления страной согласно законам общества, природы и законам, принимаемым парламентариями как нормативные акты правовой системы.

Порядок использования таких моделей в системе государственной службы следующий. Получив поручение для исполнения, чиновник определяет, к какого рода системе оно относится. Затем ищет в модели те элементы, которые касаются рассматриваемого вопроса. Информационная модель, в свою очередь, через выбранные элементы отображает процессы, происходящие не только в однородной системе, но и влияние или связь этих процессов с элементами систем другого рода.

Наглядное изображение такого представления дано в виде диаграммы на рис. 3, на котором видно, как используя системный подход согласно методологии общих систем, можно представить социальную систему во взаимосвязи с другого рода системами. На рисунке видно, что социальная система имеет взаимосвязи с информационными, экологическими, политическими, множества соответствующих элементов.



*Рис. 2. Технология формирования информационной модели мировоззрения общества и ее место в структуре социального управления страной.*

Пересечения этих моделей представляют собой алгебраическую модель, основными множествами которой являются подмножества из соответствующих множеств однородных систем, между которыми существуют отношения взаимосвязи, представленные соответствующими морфизмами. Например, алгебраические модели социальной и экологической систем, пересекаясь образуют алгебраическую модель социальной экологии. Последняя представляет собой модель, включающую в себя подмножество элементов социальной системы и подмножество элементов экологической системы, между которыми существуют определенные отношения – морфизмы. Это математическое представление систем дает возможность формировать алгебраические модели общих систем и программировать их на решающих электрических машинах для создания их информационной модели.

Таким образом, чиновник, государственный служащий видит не только возможные варианты изменений в рассматриваемой однородной системе в случае исполнения принимаемого решения, но и влияние этих изменений на состояние элементов других разнородных систем.

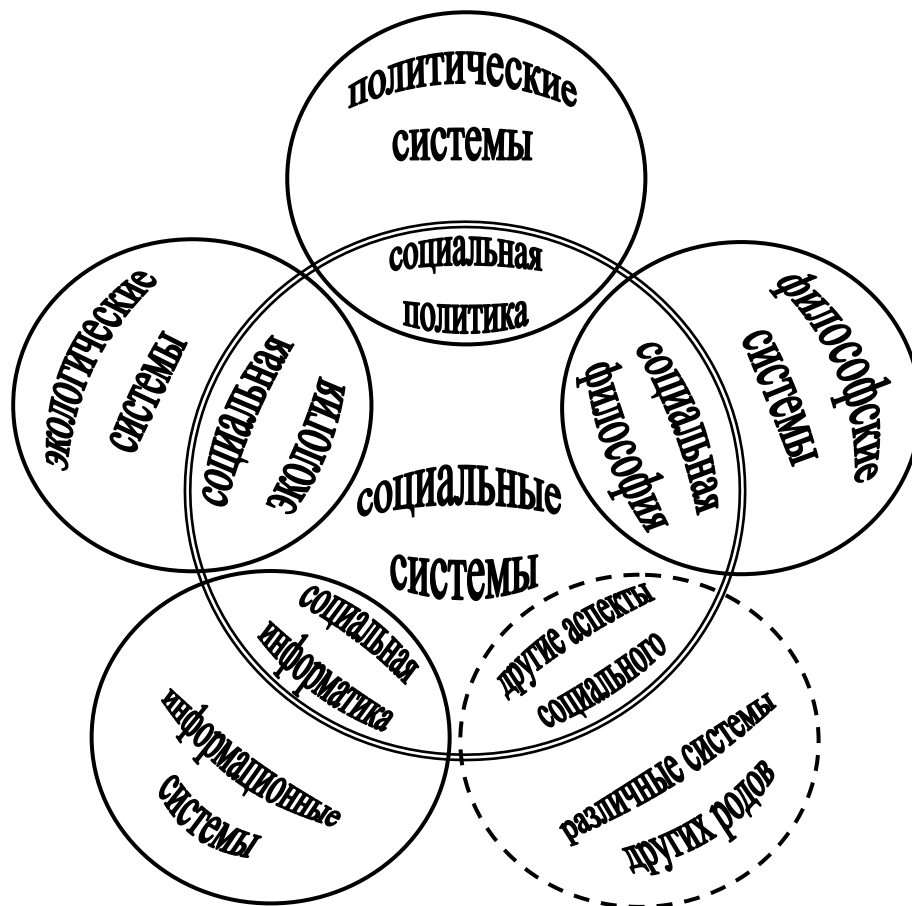


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая взаимосвязи социальной системы с другого рода системами.

Таким образом, государственному служащему при пользовании системой предоставляется возможность видеть те взаимосвязанные процессы, которые протекают в обществе и природе. При выполнении поручений он будет обязан руководствоваться именно этим представлением, а не соображением собственной выгоды. Более того, он сможет отстаивать правильность выполненного поручения перед руководством или третьей стороной.

### 3. Алгебра общих систем

Здесь даны только те из известных описаний алгебраических структур, которые использованы в работе для представления алгебры общих систем.

Под алгеброй общих систем автор предлагает понимать алгебраические системы, предназначенные для представления общих систем. Подчеркну, другими словами, что в данном случае рассматриваем алгебры как математические системы. Хотя существует и другое представление об алгебре как науке, предметом исследования которой являются различные алгебры, но здесь оно не рассматриваются.

Наряду с алгебрами рассматривают и алгебраические системы, когда на множестве  $M$  заданы не только алгебраические операции, но и некоторые отношения. Это могут быть отношения порядка или какой-либо другой взаимосвязи между элементами множества. Алгебры являются одним из частных случаев алгебраических систем. Другой частный случай – модели – это множества с определенными на них отношениями. Операции здесь не выделяются. Алгебраические системы определяются на некотором одном базисном множестве  $M$  или на нескольких основных множествах. В нашем случае приходится иметь дело с многоосновными системами. Многоосновная система – это некоторый набор множеств  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_k$ , рассматриваемый вместе с операциями и отношениями, заданными на этом наборе. В общем случае эти отношения и операции могут связывать элементы из разных основных множеств. В рассматриваемых нами общих системах мы имеем дело с множествами элементов систем различного рода. Таким образом, известны следующие понятия алгебраических систем, алгебр и моделей. Алгебраические системы – это когда на множестве  $M$  заданы не только алгебраические операции  $\Omega$ , но и некоторые отношения  $\Psi$ . Алгебра – частный тип алгебраических систем – это некоторое множество  $M$ ,

на котором задана определенная система алгебраических операций  $\Omega$ . Модели – это множества с определенными на них отношениями  $\Psi$ .

В теории общих систем рассматривают многоосновные системы – некоторый набор множеств  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_k$ , представляющих собой, соответственно, множества элементов разнородных систем – экономических, социальных, экологических, философских, политических и прочих, рассматриваемых вместе с операциями и отношениями.

В отличие от известного представления об алгебраических системах, здесь рассматривают операции на наборе, включающем набор множеств  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_k$ , и набор множеств отношений между ними  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots, \Psi_n$ . Причем в данном случае рассматривают счетные упорядоченные основные множества  $M_i$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ , и счетные упорядоченные множества отношений между их элементами  $\Psi_j$ , где  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Предлагаемая алгебра общих систем предназначена для создания на решающих электрических машинах моделей общих систем. Электрические решающие машины называют компьютерами (computer) или электронными вычислительными машинами (ЭВМ).

#### 4. Заключение

Согласно концепции теории активных систем для активного участия элементов систем в процессах необходима структура, средства активного воздействия на ситуацию в процессах. Таким инструментом может быть информационная модель мировоззрения общества, построенная согласно теории общих систем и её методологии.

Конечно, предлагаемая концепция использования информационной модели мировоззрения в технологии управления государством является тем идеалом, к которому автор предлагает стремиться обществу. Но без идеала прогрессивного развития и стремления к нему не может существовать никакое общество.

#### Литература

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теории активных систем 50 лет: история развития // Теория активных систем - 50 лет: материалы международной научно-практической конференции (18-19 нояб. 2019 г., Москва) / Российская академия наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН ; под общей редакцией В. Н. Буркова. – Москва: ИПУ РАН, 2019. – С. 10–54.
2. Леценко В.В. Теория общих систем и информационная модель мировоззрения // Системный подход в современной науке. – М.: Прогресс-Традиция, 2004. – С. 311.
3. Садовский В.Н. Основания общей теории систем: Логико-методологический анализ. М.: Наука, 1974. – 279 с.
4. Леценко В.В. Основы теории общих систем // Анализ систем на пороге XXI века: теория и практика. Материалы международной научно-практической конференции в 4-х томах. Том 1 / Сост. Т.Е. Сафонова – М.: ИНТЕЛЛЕКТ, 1996. – С. 3–9.

# СЕКЦИЯ 3.

## Активные сетевые структуры

# СЕТЕВЫЕ И НЕСЕТЕВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СОЧИ-МОДЕЛИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ<sup>2</sup>

Горбанева О.И.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

gorbaneva@mail.ru

*Аннотация.* В статье описаны результаты исследования динамических СОЧИ-моделей в различных организационных системах. СОЧИ-модели применялись для решения задач в сферах политики, образования, размещения сети магазинов, привлечения инвесторов в производство и в проекты государственно-частного партнерства, а также для регионального развития макрорегионов.

*Ключевые слова:* сетевые модели, несетевые модели, СОЧИ-модели, динамические модели, условие устойчивого развития, равновесие по Штакельбергу.

## Введение

В статье проводится обзор исследования различных моделей сочетания общих и частных интересов (далее, СОЧИ-моделей), примененных к различным сферам деятельности человека или группы людей в обществе.

Система представлена несколькими активными агентами, связанными между собой иерархическими отношениями. В моделях учитываются долгосрочные интересы элементов активной системы, которые часто зависят от различных, меняющихся во времени параметров динамической системы. В статье построены непрерывные или дискретные динамические игровые модели с целевыми функциями участников системы. В качестве решения игры ищется равновесие по Штакельбергу.

СОЧИ-модели применены к задачам в сферах политики, образования, размещения сети магазинов, привлечения инвесторов в производство и в проекты государственно-частного партнерства, а также для регионального развития макрорегионов

В каждом из рассмотренных случаев построена математическая модель, найдено ее решение, приведены рекомендации для участников системы, а также применены результаты исследования соответствующей модели на соответствующих объектах Ростовской области.

## 1. Заголовок

Модели сочетания общих и частных интересов описывают ситуацию распределения агентами своих ресурсов между некоторыми группами интересов, каждая из которых требует вложения ресурсов. Имеется некоторое объединение людей либо их групп, объединенных одной целью. В качестве примера можно привести семью, многоквартирный дом, отдел организации, вся организация, город, страна, планета. На реализацию общей цели требуются ресурсы в виде денег, времени, сил, энергии, которые у каждого агента ограничены. Но кроме общей цели у каждого участника системы есть и свои частные цели, которые также требуют вложения ресурсов со стороны агента. Перед каждым агентом стоит задача распределения имеющихся у него ресурсов между общими и частными интересами. В системе может образовываться верхний уровень, интересом которого является учет интересов всех элементов системы, для реализации которого он может применять административные и экономические методы воздействия на агентов.

В [1] исследованы статические СОЧИ-модели, в том числе и иерархические. Но на практике более применимы модели, учитывающие как многошаговое поведение агентов системы, так и изменение во времени параметров системы. Данное исследование направлено именно на применение СОЧИ-моделей к учету долгосрочных интересов ее участников. Каждая модель включает целевой функционал каждого участника системы, ограничение на выбор его стратегии, а также уравнения динамики состояния системы.

В статье далее обзорно приведено исследование следующих динамических СОЧИ-моделей:

---

<sup>2</sup> Статья написана при финансовой поддержке РФФ, проект №23-21-00131.



- Управления мнениями;
- Межрегионального взаимодействия;
- Регионального образования;
- Привлечения производственных инвестиций
- Размещения сети магазинов
- Властных иерархий.
- Каждой их приведенных моделей соответствует отдельный пункт статьи.

## 2. Модель управления мнениями клиентов в маркетинговой сети

Имеются  $n+m+1$  элементов маркетинговой сети: Центр,  $m$  агентов влияния и  $n$  базовых агентов. Центр распределяет имеющиеся у него ресурсы между агентами влияния. Агенты влияния могут использовать средства, полученные от Центра для воздействия на базовых агентов с целью привлечения последних в качестве клиентов. Базовые агенты характеризуются связями с другими базовыми агентами. Связи базового агента могут с разной интенсивностью влиять на мнения его и других базовых агентов.

Но агенты влияния кроме совместимого с Центром интереса развития маркетинговой сети имеют и свои собственные проекты, которые требуют вложения ресурсов. Под развитием маркетинговой сети подразумевается создание максимального количественного мнения у целевой аудитории о данном товаре, от которого зависят целевые функции Центра и агентов влияния.

Рассматриваемая модель принимает вид [2]:

$$\begin{aligned}
 J_0 &= \int_0^T e^{-\rho t} [\sum_{j=1}^n x_j(t) - \sum_{i=1}^m r_i(t)] dt \rightarrow \max. \\
 r_i(t) &\geq 0, \sum_{i=1}^m r_i(t) \leq R, t \in [0, T], i = 1, 2, \dots, m, \\
 x_* &\leq \sum_{j=1}^n x_j(t) \leq x^*, t \in [0, T], \\
 J_i &= \int_0^T e^{-\rho t} [\sum_{j=1}^n x_j(t) - \sum_{j=1}^n s_j^i u_j^i(t) + p_i(r_i(t) - \sum_{j=1}^n u_j^i(t))] dt \rightarrow \max, \\
 \sum_{j=1}^n u_j^i(x_j(t)) &\leq r_i(t), i = 1, 2, \dots, m, t \in [0, T], s_j^i = \begin{cases} 1, & \text{если } b_j^i > 0, \\ 0, & \text{если } b_j^i = 0, \end{cases} \\
 \dot{x}_j &= \sum_{i=1}^m b_j^i \sqrt{u_j^i(x_j(t))} + \sum_{l=1}^n \tilde{a}_{lj} x_l(t), x_j(0) = x_{j0}, j = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $n$  – число базовых агентов,  $m$  – число агентов влияния. Если  $i$ -я фирма не влияет на  $j$ -го агента, то  $b_j^i = 0$ .  $R$  – общий маркетинговый бюджет Центра,  $T$  – период рассмотрения (длина игры),  $J_0, J_i$  – функционалы выигрыша Центра и агентов влияния соответственно,  $r_i(t)$  – маркетинговый бюджет, выделяемый Центром  $i$ -му агенту в момент  $t$ ,  $x_j(t)$  – мнение  $j$ -го базового агента в момент  $t$ ,  $u_j^i(t)$  – расходы  $i$ -го агента влияния на маркетинговое воздействие на  $j$ -го базового агента в момент  $t$ ,  $b_j^i$  – коэффициент воздействия  $i$ -го агента влияния на  $j$ -го базового агента,  $\rho$  обозначает коэффициент дисконтирования,  $\tilde{a}_{ij}$  – коэффициент влияния  $i$ -го базового агента на прирост мнения  $j$ -го в дискретной модели с условием на элементы матрицы  $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = 0, -1 \leq \tilde{a}_{ii} \leq 0, i = 1, 2, \dots, n$ .

Данная модель исследуется в [2] при помощи уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана.

В [2] показано, что в данной модели выполняется условие живучести, если изначально выполнялось условие  $\sum_{j=1}^n x_{j0} \geq x_*$ . Уменьшаться суммарное мнение не может, то есть нижняя граница условия  $x_* \leq \sum_{j=1}^n x_j(t) \leq x^*$  не нарушается. При достижении верхней границы рассматриваемого фазового ограничения необходимо прекратить выделение ресурсов агентам влияния с тем, чтобы не нарушилось верхнее условие фазового ограничения.

Также проведена сравнительная характеристика результатов при благожелательном к агентам влияния Центре (в состав целевой функции которого входят слагаемые с частными интересами агентов) и безразличном, целевая функция которого приведена в (1). В случае безразличного к интересам агентов Центра он готов выделить всем агентам больше ресурсов, чем в итоге выделяет, но при условии, что те потратят их только на общие цели. В случае благожелательного Центра он готов выделить больше ресурсов чем в случае безразличия только одному избранному (наиболее эффективному) агенту влияния. Остальным же агентам выделяется величина, меньшая, чем если бы Центр был бы неблагожелательным. Причем остальных агентов Центр заставляет больше ресурсов тратить на общие цели, чем в случае своей безразличности.

## 3. Модель межрегионального сотрудничества

Рассматривается модель межрегионального сотрудничества в составе более крупного их объединения – макрорегиона. Модель основана на неоклассической модели Солоу региона, параметрами состояния которой являются количество основных фондов, занятое население и эффективность трудовых ресурсов. В данном случае модели Солоу каждого региона объединены и подчинены целевой функции

макрорегиона. Также рассмотрена экологическая составляющая развития регионов, а именно учитываются объемы сбросов загрязняющих веществ в атмосферу и воду с учетом возможных очищений.

Итак, модель имеет следующий вид [3]:

$$Y_i(t) = A_i(t)K_i^{\alpha_i}(t)(R_iL_i)^{1-\alpha_i}(t). \quad (2)$$

$$I_i(t) = s_i(t)Y_i(t). \quad (3)$$

$$C_i(t) = [1 - s_i(t)]Y_i(t). \quad (4)$$

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = \eta_i R_i(t). \quad (5)$$

$$\frac{dK_i(t)}{dt} = -\mu_i K_i(t) + \sum_{j=1}^n \kappa_{ji}(t)I_j(t). \quad (6)$$

$$\frac{dL_i(t)}{dt} = (b_i - m_i)L_i(t); \quad (7)$$

$$P_i^a(t) = [1 - c_i^a v_i^a(t)I_i(t)][B_{K_i}^a K_i(t) + B_{L_i}^a L_i(t)]. \quad (8)$$

$$P_i^w(t) = [1 - c_i^w v_i^w(t)I_i(t)][B_{K_i}^w K_i(t) + B_{L_i}^w L_i(t)]. \quad (9)$$

$$K_i(0) = K_i^0; \quad L_i(0) = L_i^0; \quad R_i(0) = R_i^0; \quad (10)$$

$$\sum_{j=0}^n \kappa_{ij}(t) + v_i^a(t) + v_i^w(t) = 1; \quad i, j = 0, 1, \dots, n; \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

$$0 \leq s_i(t) \leq 1; \quad \kappa_{ij} \geq 0; \quad v_i^a(t) \geq 0; \quad v_i^w(t) \geq 0.$$

Индекс  $i$  обозначает субъект в составе федерации (например, регион). Время  $t = 0, 1, 2, \dots$  в модели дискретно и изменяется с шагом в один год. Обозначения переменных и параметров модели:  $Y_i(t)$  - конечный продукт агента в финансовом выражении в году  $t$ ;  $K_i(t)$  - основные производственные фонды агента в финансовом выражении (капитал) агента в году  $t$ ;  $L_i(t)$  - трудовые ресурсы агента в году  $t$ ;  $R_i(t)$  - эффективность трудовых ресурсов агента в году  $t$ ;  $A_i(t)$  - функция влияния инновационной активности агента на производство конечного продукта в году  $t$ ;  $\alpha_i$ - параметр производственной функции Кобба-Дугласа для агента;  $I_i(t)$  - величина производственных инвестиций агента в году  $t$ ;  $C_i(t)$  - объем непродовственного потребления агента в году  $t$ ;  $s_i(t)$  - доля производственных инвестиций агента в его конечном продукте в году  $t$ ;  $\eta_i$ - параметр роста эффективности трудовых ресурсов агента;  $\mu_i$ - коэффициент амортизации основных фондов агента;  $\kappa_{ij}(t)$  - доля инвестиций  $i$ -го агента в деятельность  $j$ -го агента (коэффициент взаимодействия между агентами); здесь индекс  $j=0$  означает внешнего по отношению к системе агента;  $b_i, m_i$ - коэффициенты воспроизводства и выбытия трудовых ресурсов для агента;  $P_i^a(t), P_i^w(t)$  - выбросы агентом загрязняющих веществ в атмосферу и воду соответственно в году  $t$ ;  $v_i^a(t), v_i^w(t)$  - ассигнования агента на борьбу с загрязнением атмосферы и воды соответственно в году  $t$ ;  $c_i^a, c_i^w$ - коэффициенты эффективности природоохранных ассигнований;  $B_{K_i}^a, B_{K_i}^w$ - удельные выбросы загрязняющих веществ при производственной деятельности в атмосферу и воду соответственно;  $B_{L_i}^a, B_{L_i}^w$ - удельные выбросы загрязняющих веществ при жизнедеятельности трудовых ресурсов в атмосферу и воду соответственно;  $K_i^0, L_i^0, R_i^0$ - заданные начальные значения соответствующих переменных модели.

В модели (2) — (11) учитывается, что пополнять основные фонды можно не только за счет собственных инвестиций региона, но и за счет инвестиций других регионов. Стратегиями регионов являются доля  $s_i(t)$  от конечного продукта, которая идет на инвестиции в производство, которые в свою очередь включают вложение средств на развитие своего и соседних регионов  $\kappa_{ij}(t)$  и на очистку окружающей среды, а именно воды  $v_i^w(t)$  и воздуха  $v_i^a(t)$ .

Критерий оптимальности региона в модели (2)-(11) состоит из суммы двух слагаемых: доход от частной деятельности и от общей. В качестве частных интересов выступают удельное потребление региона, в качестве же общих интересов берется удельное потребление всего макрорегиона, куда входит регион:

$$\bar{J}_i = \sum_{t=1}^T e^{-\rho t} [c_i(t) + r_i(t)c(t)]. \quad (12)$$

В качестве частной функции полезности региона взято удельное потребление (потребление на душу населения)  $c_i(t) = \frac{C_i(t)}{L_i(t)}$ , в качестве полезности макрорегиона взято удельное потребление макрорегиона в целом  $c(t) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i(t)}{\sum_{i=1}^n L_i(t)}$ . Коэффициент  $r_i(t)$  отражает заинтересованность региона в повышении удельного потребления всего макрорегиона.

Результаты исследования модели (1)-(12) были применены к регионам Южного федерального округа. Были получены следующие результаты. Всем регионам Южного федерального округа одновременно удастся повысить ВРП на 2% и уменьшить загрязнения воздушной и водной среды на 7% по сравнению с изначальными значениями. При этом Волгоградская область и Астраханская область почти все средства должны направить на восполнение основных фондов, оставляя незначительную часть на потребление. Причем Астраханской области не хватит своих средств на повышение ВРП, ей в должна помочь Ростовская область, направив 40% своих инвестиций в развитие соседнего региона. Меньше всего средств на инвестиции в развитие может направить Республика Адыгея – 22%. Все остальные регионы инвестируют 55-60%.

Повысить ВРП всех регионов ЮФО на 3% не удастся, так как Ростовской области придется направить все средства на помощь Астраханской области. Возможна ситуация одновременного повышения ВРП на 3% для всех регионов, кроме Астраханской области, при этом она сможет повысить ВРП только на 1%. При этом Волгоградская область, Республика Крым и Республика Калмыкия на инвестиции должны направить 87% бюджетных ресурсов. Меньше всего на инвестиции сможет направить Республика Адыгея - 35%. Остальные регионы – около 80%. Ростовская область должна направить в Волгоградскую область – до 40% своих инвестиций.

Максимально увеличить ВРП можно на 8% для Республики Адыгея, на 7% - для Ростовской области, на 4% - для Республики Калмыкии и Республики Крым, на 3% - для Краснодарского края, на 2% - для Волгоградской области, на 1% - для Астраханской области. В этом случае Краснодарский край должен выделить на инвестиции в Ростовскую область - 20% ресурсов. Примечательно, что в этом случае Краснодарскому краю не хватит средств на повышение ВРП с 3% до 4%, но хватает ресурсов, чтобы повысить ВРП Ростовской области с 5% до 7%.

Также в модель были введены соотношения, учитывающие привлечение частных крупных предприятий регионов к проектам развития регионов в виде ГЧП. При выделении 10 % средств от ВРП, полученных на предыдущем этапе на развитие проектов ГЧП, ВРП в течение 5 лет можно повысить на 50%, а при выделении 20% средств на развитие проектов ГЧП ВРП удастся повысить на 60% по сравнению с имеющимся на начальный момент времени. При этом регион приобретает независимость от других регионов Южного Федерального Округа и может справляться с социо-экономическим развитием без их помощи.

#### 4. Модель регионального образования

Имеется Министерство образования федерального субъекта (далее Министерство) и вузы, расположенные под его ведомством. Вузы осуществляют подготовку специалистов по  $M$  специальностям. Студенты могут обучаться в вузе как на бюджетных местах, так и на коммерческих. Бюджетные места в вуз выделяются государством, на их количество руководство вуза не влияет. Но количество коммерческих мест на конкретные специальности вуз может повлиять. Вуз определяет стоимость коммерческого обучения студентов по каждой специальности. Министерство определяет финансовый подушевой норматив, выплачиваемый государством вузу за каждого бюджетного студента. Вуз также несет расходы на обучение определенного числа студентов (как коммерческих, так и бюджетных). Не все объявленные вузом коммерческие места могут быть востребованы абитуриентами. Спрос на коммерческие места специальности вуза прямо пропорционален будущей зарплате выпускника вуза, если он пойдет работать по данной специальности, и противоположно пропорционален цене обучения. Также специальность тем привлекательнее для абитуриентов, чем больше выпускников по ней уже работает по специальности. При выбранном периоде прогнозирования  $T$  математическая модель иерархической системы Министерства и  $n$  вузов имеет вид иерархической игры  $(n+1)$ -го лица:

$$J_0 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{0j} x_{ij}(t) \rightarrow \max. \quad (13)$$

$$x_{ij}^B(t) \geq 0, a_{ij}^B(t) \geq 0. \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij}^B x_{ij}^B(t) \leq B. \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}(t) \geq x_j^{\min}. \quad (16)$$

$$J_i = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \left[ a_{ij}^B x_{ij}^B(t) + a_{ij}^C x_{ij}^C(t) - c_{ij} (\sum_{j=1}^M x_{ij}(t))^2 \right] \rightarrow \max. \quad (17)$$

$$x_{ij}^C(t) \geq 0, a_{ij}^C(t) \geq 0; \quad (18)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}^B(t+1) + \min\{x_{ij}^C(t+1), (\gamma_j - a_{ij}^C(t)/4)^{\alpha_j} y_{ij}(t)\}, x_{ij}(0) = x_{ij0}. \quad (19)$$

$$y_{ij}(t+1) = (1 - \kappa_{ij}) x_{ij}(t), y_{ij}(0) = y_{ij0}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T. \quad (20)$$

Здесь  $N$  - число образовательных организаций в регионе;  $M$  - число направлений подготовки;  $T$  - период планирования (длина игры);  $B$  - ежегодный бюджет,  $x_{ij}(t)$  - число студентов  $j$ -го направления подготовки в  $i$ -й организации в году  $t$ ;  $x_{ij}^B(t)$  - число бюджетных мест по  $j$ -му направлению в  $i$ -й организации в году  $t$ ;  $x_{ij}^C(t)$  - число коммерческих мест по  $j$ -му направлению в  $i$ -й организации в году  $t$ ;  $x_j^{\min}$  - минимально допустимый выпуск по  $j$ -му направлению;  $a_{0j}$  - общественная полезность выпускника  $j$ -го направления подготовки;  $a_{ij}^B(t)$  - бюджетная субсидия на одного студента  $j$ -го направления в  $i$ -й организации в году  $t$ ;  $a_{ij}^C(t)$  - стоимость коммерческого обучения по  $j$ -му направлению в  $i$ -й организации в году  $t$ ;  $\gamma_{ij}$  - коэффициент влияния перспектив трудоустройства на желание поступления по  $j$ -му направлению в  $i$ -й организации;  $\kappa_{ij}$  - доля нетрудоустроенных выпускников по  $j$ -му направлению в  $i$ -й организации;  $c_i$  - коэффициент затрат  $i$ -й организации на обучение в зависимости от общего числа студентов в году  $t$ .

Соотношение (13) задаёт цель управления Центра и трактуется как максимизация общественной полезности. Соотношение (16) трактуется как условие устойчивого развития.

Общие выводы по исследованию модели следующие [4]. Если вузу выделены бюджетные места по направлению подготовки, то на коммерческие места не остается ресурсов. Предложение коммерческих мест сверх бюджетных в этом случае приводит к убыткам. Экономическая целесообразность предложения большого количества коммерческих мест сохраняется только в случае отсутствия бюджетного набора. Ситуация с выделением небольшого количества бюджетных мест показывает экономические преимущества, позволяя вузу объявлять максимум коммерческих мест в пределах ресурсного потенциала и, соответственно, получать больший доход.

Рекомендации для вуза: определить приоритет набора – бюджетный или коммерческий. И, если в приоритете обучать студентов на бюджетных местах, то вузам стоит между собой поделиться по непересекающимся между собой специальностям. Государству же выгодно давать сразу все бюджетные места специальности тому вузу, который тратит меньше всего на их обучение.

Результаты исследования модели применены к трем опорным вузам Ростовской области: Южному федеральному университету (ЮФУ), Донскому государственному техническому университету (ДГТУ), Ростовскому государственному медицинскому университету (РостГМУ).

Кооперация среди вузов не влияет на их поведение, потому что двум вузам (ДГТУ и РостГМУ) выделяется столько бюджетных мест, что они не нуждаются в коммерческих студентах, а значит, они не являются конкурентами третьему вузу (ЮФУ). Применительно к вузам Ростовской области иерархия не влияет на выбор их оптимальной стратегии, потому что выбор имеет только ЮФУ.

Также в модель (13)-(20) между вузами была введена сеть, ребра которой отражают расстояние между вузами, но на результаты исследования модели введение сети не повлияло.

## 5. Модель привлечения производственных инвестиций

В основу построения модели производственных инвестиций в иерархической системе управления "инвестор - предприятия - сотрудники" положены следующие принципы. 1. Инвестор полностью делит свой ресурс между производственными и финансовыми инвестициями (СОЧИ-идеология), потребление здесь не учитывается. Процентная ставка по инвестициям - параметр управления внешнего по отношению к модели финансового регулятора. Выигрыш инвестора - его суммарный дисконтированный доход с момента инвестирования. 2. При распределении инвестиций между предприятиями инвестор учитывает их сравнительную доходность, например, на основе принципа пропорционального распределения. 3. Ресурс предприятия складывается из средств инвестора и собственных средств, полученных в результате производственной деятельности. Руководство предприятия делит его ресурс между контролем производственных усилий сотрудников, их вознаграждением и собственным вознаграждением, возможно, включающим доход от нецелевого использования ресурсов (СОЧИ-идеология). 4. Сотрудники делят своё время между производственной и частной деятельностью, характер которой зависит от типа предприятия. Соответственно, выигрыш сотрудника складывается из вознаграждения за участие в производстве (которое может зависеть от его результатов) и дохода от частной деятельности (СОЧИ-идеология). 5. Доход предприятия пропорционален суммарным производственным усилиям его сотрудников. Доход влияет как непосредственно на возможности вознаграждения руководства и сотрудников предприятия, так и на его инвестиционную привлекательность.

Модель производственных инвестиций в иерархической системе управления имеет следующий вид.

$$J_0 = \sum_{t=1}^T \delta^t R^t \rightarrow \max. \quad (21)$$

$$0 \leq \sigma^t \leq 1; 0 \leq b^t \leq 1. \quad (22)$$

$$J_i = \sum_{t=1}^T \delta^t r_i^t R_i^t \rightarrow \max. \quad (23)$$

$$q_{ij}^t \geq 0; r_{ij}^t \geq 0; r_i^t \geq 0; r_i^t + \sum_{j=1}^{n_i} (q_{ij}^t + r_{ij}^t) \leq 1; \quad (24)$$

$$J_{ij} = \sum_{t=1}^T \delta^t [r_{ij}^t R_i^t + G_{ij}(1 - u_{ij}^t)] \rightarrow \max; \quad (25)$$

$$q_{ij}^t \leq u_{ij}^t \leq 1; \quad (26)$$

$$a_i^t = (1 - b^t) R_i^t / (\sum R_i^t). \quad (27)$$

$$R^t = [1 - \sigma^t (b^t + \sum_{i=1}^N a_i^t) R^{t-1} + \sum_{\tau=1}^{t-1} \sigma^\tau (\beta b^\tau + \sum_{i=1}^N \alpha_i a_i^\tau) R^\tau], R^0 = R_0; \quad (28)$$

$$R_i^t = [1 - r_i^t - \sum_{j=1}^{n_i} (q_{ij}^t + r_{ij}^t)] R_i^{t-1} + F_i (\sum_{j=1}^{n_i} u_{ij}^t) + a_i^t \sigma^t R^t, R_i^0 = R_{i0}; \quad (29)$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, n_i; t = 1, \dots, T.$$

Здесь  $J_0, J_i, J_{ij}$  - выигрыши инвестора, руководства предприятий и их сотрудников за время  $T$ ;  $F_i$  - производственная функция  $i$ -го предприятия;  $G_{ij}$  - функция дохода сотрудника от частной деятельности;  $R^t$  - инвестиционный ресурс;  $R_i^t$  - ресурс предприятия  $i$  в момент  $t$ ;  $\alpha_i \in [0, 1], \beta \in [0, 1]$  - процентные ставки по производственным и финансовым инвестициям;  $\delta \in (0, 1)$  - коэффициент дисконтирования;  $\sigma^t$  - общая доля инвестиций в капитале;  $a_i^t$  - доля производственных инвестиций в  $i$ -е предприятие;  $b^t$  - доля финансовых инвестиций;  $r_i^t$  - доля вознаграждения руководства предприятия;  $r_{ij}^t$  - доля вознаграждения сотрудника;  $u_{ij}^t$  - доля расхода времени  $j$ -го сотрудника  $i$ -го предприятия на производственную

деятельность (производственное усилие);  $q_{ij}^t$ - устанавливаемое руководством  $i$ -го предприятия ограничение снизу на величину  $u_{ij}^t$ ;  $R_0, R_{i0}$ - начальные значения ресурсов. Индекс  $i = 1, \dots, N$  определяет номер предприятия,  $N$  - число предприятий; индекс  $j = 1, \dots, n_i$  задаёт номер сотрудника,  $n_i$ - число сотрудников  $i$ -го предприятия; индекс  $t = 1, \dots, T$  определяет момент времени.

Соотношения (21)-(29) определяют иерархическую разностную игру.

Выявлены условия, при которых производственные инвестиции оказываются выгодными для инвестора, чем инвестиции в банк. Исследовано влияние производственных мощностей предприятий и частной деятельности агентов нижнего уровня, а также влияние функций затрат предприятий на контроль деятельности агентов на стратегию инвестора, на его доход, на выбор рабочего режима агентами нижнего уровня и на прибыль предприятия.

## 6. Модель размещения сети магазинов

Имеется двухуровневая система торговой сети из  $n$  магазинов. Между любыми двумя магазинами с номерами  $i, j$  имеется расстояние  $e_{ij}$ . Для развития торговой сети требуется определённое количество магазинов. По мере роста количества магазинов количество покупателей сети растёт, но это не обязательно так для конкретного магазина. Здесь имеется следующая закономерность. Если открывается ещё один магазин данной сети, то его влияние на количество покупателей уже имеющегося магазина зависит от его расстояния до нового магазина. Если новый магазин находится на достаточно большом расстоянии, то количество покупателей сети растёт, так как сеть становится более популярной. Но если новый магазин сети находится близко от уже имеющегося, то он тем самым забирает часть покупателей уже имеющегося магазина. Чем ближе находятся магазины друг к другу, тем меньше у каждого из них в итоге становится покупателей. И наступает такой момент, что добавление нового магазина не приносит прибыли сети, так как просто перераспределяет одно и то же количество клиентов между магазинами. То есть, чем меньше расстояние  $e_{ij}$ , тем меньше прибыль конкретного магазина.

Найдем функцию влияния на прибыль магазина другого магазина, находящегося от него на расстоянии  $d$ , из следующих естественных соображений. Если расстояние между магазинами достаточно большое, то на прибыль магазина это почти не влияет, то есть магазин сохраняет почти 100 процентов прибыли, которая имелаась до введения нового магазина. Чем меньше расстояние между магазинами, тем больше прибыли магазина забирает введение нового магазина. Причем малые значения расстояния сильнее сказываются на прибыли, чем большие. Значит, функция имеет экспоненциальную вогнутую форму вида  $f(d) = 1 - \delta^d$ , где параметр  $\delta$ ,  $0 < \delta < 1$  зависит от плотности населения данной местности. Заметим, что  $\lim_{\delta \rightarrow 0} f(d) = 0$ , что соответствует значительным потерям от конкуренции вплоть до отсутствия дохода при нахождении двух магазинов одной сети в одной точке,  $\lim_{\delta \rightarrow +\infty} f(d) = 1$ , что соответствует отсутствию влияния на прибыль магазинов этой же сети, если их нет, или они находятся на недоступном расстоянии.

Но так как в случае торговой сети магазин  $i$  может соседствовать с несколькими магазинами  $j$  на соответствующих расстояниях  $e_{ij}$ ,  $j=1, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ , то влияние всех других магазинов данной местности на прибыль магазина  $i$  будет иметь вид  $f(e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}) = \prod_{j \neq i}^n (1 - \delta^{e_{ij}})$ . С учётом этой

функции влияния других магазинов местности на прибыль магазина  $i$  и формируются целевые функции агентов.

Торговая сеть задаётся неориентированным графом  $G = \langle N, E \rangle$ , где  $N = \{0, 1, \dots, n\}$ , индекс 0 обозначает логистический центр, остальные вершины - агентов (магазины). Матрица  $E = (e_{ij})$  есть симметричная матрица расстояний, в которой элементы по главной диагонали  $e_{ij} = 0$  (с естественной интерпретацией расстояния магазина до самого себя). Центр в каждый момент времени имеет количество товаров  $g(t)$ . Товары распределяются между магазинами с целью последующей продажи. Товар продаётся по цене  $p$ . Доход сети образуется из доходов от продажи товара во всех магазинах. Количество товара, проданного в магазине, зависит от усилий работников магазина  $a_i(t)$ . Его смысл – процент товаров, проданных в магазине. Расходы Центра на доставку товара до магазина пропорциональны расстоянию от магазина до склада Центра:  $c$ - затраты на доставку товара на расстояние, равное одному ребру;  $m_i$ - длина кратчайшей цепи от Центра до  $i$ -го агента. С учётом дисконтирования по времени с коэффициентом  $\rho$  выигрыш Центра за период прогнозирования  $T$  лет имеет вид:

$$J_0 = \int_0^T e^{-\rho t} \sum_{i=1}^n [(\prod_{j \neq i}^n (1 - \delta^{e_{ij}}) p a_i(t) - m_i c) g_i(t)] dt \rightarrow \max. \quad (30)$$

при ограничениях

$$g_i(t) \geq 0, \sum_{i=1}^n g_i(t) = g(t). \quad (31)$$

Доход магазина за период  $T$  лет состоит из дохода от общесетевой деятельности плюс дохода от частной деятельности. Общесетевая деятельность касается усилий по продаже сетевого товара. Остальные усилия  $(1 - a_i(t))$  направляются на привлечение покупателей дополнительными средствами:

развитие именно своего магазина, его расширение, обустройство, собственные акции и т.д. Пусть усилия  $1 - a_i(t)$  дают прирост в доходе в виде производственной функции  $k_i(1 - a_i(t))$ , где  $k_i$  - эффективность использования  $i$ -м агентов средств, не выделенных им на маркетинг. С учётом дисконтирования целевая функция одного сетевого магазина выглядит следующим образом:

$$J_i = \int_0^T e^{-\rho t} \left[ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (1 - \delta^{ej}) p a_i(t) g_i(t) + k_i(1 - a_i(t)) \right] dt \rightarrow \max. \quad (32)$$

при ограничении

$$0 \leq a_i(t) \leq 1. \quad (33)$$

Количество покупателей  $i$ -го магазина сети  $x_i(t)$  со временем уменьшается с коэффициентом  $d$  в случае отсутствия усилий работников магазина по привлечению клиентов и продаже товаров. Кроме усилий самого магазина, на количество клиентов в магазине влияют другие расположенные поблизости магазины данной сети. Тогда уравнение динамики с начальными условиями принимает вид

$$\dot{x}_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (1 - \delta^{ej}) a_i(t) g_i(t) - dx_i(t), \quad x_i(0) = x_{i0}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (34)$$

Будем считать, что для устойчивого развития сети магазинов требуется, чтобы общее количество покупателей во всех магазинах за весь период прогнозирования было не меньше заданной нижней границы  $x^*$ , определяющей жизнеспособность системы:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n x_i(t) \geq x^*. \quad (35)$$

Модель (30)-(36) представлена в виде иерархической дифференциальной игры, в которой найдено равновесие по Штакельбергу. Модель применена на сети магазинов «Вкусвилл» Ростовской области. Выведены рекомендации для размещения магазинов сети в заданной области на плоскости. Рекомендуются первые несколько магазинов размещать в центре заданной области на значительном расстоянии друг от друга. Следующие появляющиеся со временем магазины следует размещать уже в спальных районах города.

## 7. Модель борьбы за власть

Предметом анализа в модели выступает властная иерархия, задача которой состоит в максимальном увеличении её властного ресурса [5]. Участники властной группировки связаны отношениями личной преданности и действуют как единое целое. Рассматривается три уровня иерархии.

1. Будем представлять властную иерархию древовидным ориентированным графом, дуги которого отображают соподчинённость её членов (агентов). Дуга означает, что конечная вершина подчинена начальной. Корневую вершину дерева (первый уровень иерархии) назовём Центром. Второй уровень образуют агенты влияния, подчинённые Центру. На третьем уровне находятся базовые агенты.

2. Каждое невырожденное поддерево с одним из агентов влияния в качестве корня образует властную группировку в рамках данной иерархии. Иерархия в целом - предельный случай властной группировки во главе с Центром.

3. Имеется несколько трёхуровневых властных иерархий, конкурирующих за ресурс, создаваемый общими усилиями всех агентов. Будем для простоты считать этот ресурс финансовым. В каждый момент дискретного времени доля ресурса, контролируемая любой властной группировкой, в т.ч. иерархией, пропорциональна совокупным усилиям агентов нижнего уровня этой группировки. Заметим, что механизм пропорционального распределения служит одним из методов экономического управления (побуждения). Распределение контроля над ресурсом между властными группировками не меняет его количества, что важно для определения динамики ресурса.

4. Каждый агент (в т.ч. Центр) делит личное время между усилиями по увеличению доли властного ресурса своей группировки и конкуренцией. Соответственно, выигрыш агента складывается из полезности от увеличения совместно создаваемого ресурса и от победы над конкурентами (СОЧИ-идеология), что отвечает отношениям конкуренции-кооперации.

5. Базовые агенты конкурируют с другими базовыми агентами, подчинёнными тому же агенту влияния. В качестве управления они используют время на увеличение властного ресурса своей группировки.

6. Агенты влияния конкурируют с другими агентами влияния своей властной иерархии. В качестве управления они используют контроль деятельности своих базовых агентов.

7. Центры конкурируют с Центрами других властных иерархий. Их управление - также контроль деятельности своих агентов влияния. Таким образом, Центр и агенты влияния осуществляют административное управление (принуждение).

Итак, модель системы трёхуровневых властных иерархий имеет следующий вид.

$$J_i = \sum_{t=1}^T \delta^t [(A - \sum_{p=1}^N v_p^t) v_i^t + R_i^t] \rightarrow \max. \quad (36)$$

$$0 \leq q_{ij}^t \leq 1; \quad (37)$$

$$J_{ij} = \sum_{t=1}^T \delta^t [(A_{ij} - \sum_{r=1}^{n_i} v_{ir}^t) v_{ij}^t + R_{ij}^t] \rightarrow \max. \quad (38)$$

$$q_{ij}^t \leq q_{ijk}^t \leq 1; \quad (39)$$

$$J_{ijk} = \sum_{t=1}^T \delta^t [(A_{ij} - \sum_{s=1}^{m_{ij}} v_{ijs}^t) v_{ijk}^t + R_{ijk}^t] \rightarrow \max. \quad (40)$$

$$q_{ijk}^t \leq u_{ijk}^t \leq 1; \quad (41)$$

$$R^t = \left(1 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t\right) R^{t-1}, \quad R^0 = R_0. \quad (42)$$

$$R_i^t = \begin{cases} R^t \left( \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t \right) / \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t \right), & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t > 0; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (43)$$

$$R_{ij}^t = \begin{cases} R_i^t \left( \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t \right) / \left( \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t \right), & \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t > 0; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (44)$$

$$R_{ijk}^t = \begin{cases} R_{ij}^t u_{ijk}^t / \left( \sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t \right), & . \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (45)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{ij}} u_{ijk}^t > 0; \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, n_i; \quad k = 1, \dots, m_{ij}; \quad t = 1, \dots, T.$$

Здесь  $i$  - индекс Центра (властной иерархии);  $j$  - индекс агента влияния (властной группировки) данной иерархии;  $k$  - индекс базового агента данной группировки;  $t$  - индекс шага по времени;  $N$  - число властных иерархий;  $n_i$  - число властных группировок данной иерархии;  $m_{ij}$  - число базовых агентов данной группировки;  $J_i, J_{ij}, J_{ijk}$  - выигрыши Центра, агента влияния и базового агента соответственно;  $R^t, R_i^t, R_{ij}^t, R_{ijk}^t$  - общий ресурс, ресурс властной иерархии, властной группировки и базового агента соответственно;  $q_{ij}^t$  - управление Центра;  $\sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}^t$  - доля усилий Центра на контроль своей иерархии;  $v_i^t = 1 - \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}^t$  - доля его усилий на конкуренцию с другими Центрами;  $q_{ijk}^t$  - управление агента влияния;  $\sum_{k=1}^{m_{ij}} q_{ijk}^t$  - доля усилий агента влияния на контроль своей группировки;  $v_{ij}^t = 1 - \sum_{k=1}^{m_{ij}} q_{ijk}^t$  - доля его усилий на конкуренцию с другими агентами влияния своей иерархии;  $u_{ijk}^t$  - доля усилий базового агента на увеличение ресурса;  $v_{ijk}^t = 1 - u_{ijk}^t$  - доля его усилий на конкуренцию с другими базовыми агентами своей группировки;  $A, A_i, A_{ij}$  - параметры конкуренции;  $\delta \in (0,1)$  - коэффициент дисконтирования;  $R_0$  - начальное значение общего ресурса;  $T$  - горизонт планирования.

Модель (36) – (45) исследуется аналитически [5]. Даны постановки задач исследования, исследовано число полюсов власти, проведены численные расчёты для тестового примера. Кроме того, предложена альтернативная постановка модели конкуренции за ресурс, проведено её аналитическое и численное исследование с помощью метода качественно репрезентативных сценариев имитационного моделирования.

## 8. Заключение

В статье проведен обзор исследования различных СОЧИ-моделей, примененных к различным сферам деятельности человека или группы людей в обществе. СОЧИ-модели применены к задачам в сферах политики, образования, размещения сети магазинов, привлечения инвесторов в производство и в проекты государственно-частного партнерства, а также для регионального развития макрорегионов

В каждом из рассмотренных случаев построена математическая модель, найдено ее решение, приведены рекомендации для участников системы, а также применены результаты исследования соответствующей модели на соответствующих объектах Ростовской области.

Получены следующие результаты.

## Литература

1. Горбанева О.И. Статические модели распределения ресурсов с учетом согласования интересов активных агентов: диссертация ... доктора Технические науки: 05.13.10 / Горбанева Ольга Ивановна; [Место защиты: ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук], 2019. – 383 с
2. Gorbaneva O.I., Ougolnitsky G.A. Sustainability of Intertwined Supply Networks: A Game-Theoretic Approach // Games. 2022. - 13. 35. 10.3390/g13030035.
3. Горбанева О.И., Мурзин А.Д., Угольницкий Г.А. Динамическая СОЧИ-модели регионального развития: сравнительный анализ административных и экономических механизмов управления (на примере Южного федерального округа) // Математическая теория игр и ее приложения. – 2021. – Т. 13, N 1. – С. 59–88.
4. Gorbaneva O.I., Murzin A.D., Ougolnitsky G.A., Mikhalkovich S.S. A Cognitive Simulation Model of a Regional Higher Education System// In book: Modeling and Simulation of Social-Behavioral Phenomena in Creative Societies. 2023. – pp. 27-47. - 10.1007/978-3-031-33728-4\_3.
5. Горбанёва О.И., Угольницкий Г.А. Модели управления во властных иерархиях // Проблемы управления., 2024, №1, сс. 43–56.

# РОЛИ ОРГАНИЗАТОРОВ В ИМИТАЦИОННЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ИГРАХ

**Ерешко Ф.И.**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, кор. 2  
fereshko@yandex.ru*

*Аннотация. Рассматриваются проблемы принятия решений в модели взаимодействия игроков в двухуровневой организационной системе. Описан мировой и отечественный опыт исследования межгосударственных экономических и экологических взаимодействий и формирования системы балансовых соотношений. Формулируются основные методические основания проведения исследований, выработки рекомендаций к действию, стратегий поведения органов регулирования на основе принципа Парето.*

*Ключевые слова: коалиция, организация, система, Центр, игры, не противоположные интересы, Парето, системный анализ, модели, балансы, процедура, алгоритм.*

## **Введение**

Направление исследования имитационных игр возникло в рамках работ по системному анализу и исследованию операций в попытках решения принципиальных затруднений при формализации целевых установок участников конфликтных процессов. Затруднения состояли в большой неопределённости намерений и многокритериальности устремлений. Идея состояла в том, чтобы привлечь к подготовке по принятию решений непосредственных участников конфликтных ситуаций, предоставляя им возможности принять решения в модельной обстановке. В школе академика Моисеева Н.Н. в целях прогнозирования был предложен объединённый имитационный подход, в рамках которого для описания реальных процессов используются математические модели, а принятие решений осуществляется реальными участниками имитационной игры. Разработчиком игры был член-корреспондент РАН Павловский Ю.Н. [1-3].

Изложение основывается на проведенной имитационной игре в ВЦ РАН (СССР) группой сотрудников Отдела Моисеева Н.Н., в которой принял участие автор и подробно описанной в брошюре Павловского Ю.Н., см. № 6, 1990, издание «Знание».

Как говорил академик Н.Н. Моисеев : «Мы решили придумать свою собственную планету, населить ее вымышленными персонажами, наделить эти персонажи способностью создавать технологии, вести войну и т.д.»

Цель настоящей работы состоит в демонстрации теоретических возможностей в построении и использовании адекватных математических моделей для принятия решений в организационных системах.

В работе используются аналитические конструкции, в которых учитывается асимметрия в принятии решений [1].

В рамках этой теории в качестве основных характеристик иерархических систем рассматриваются следующие: а) наличие выделенного участника (Центра) системы, обладающим правом первому выбирать стратегию в зависимости от имеющейся или предполагаемой информации о действиях подчиненных звеньев управления, и сообщать ее нижнему уровню, б) Центр осуществляет свой выбор, опираясь на принцип наибольшего гарантированного результата. Ставится задача об отыскании наилучшего поведения центра с учетом активного поведения подчиненных систем, стремящихся к достижению собственных целей, действуя в рамках правил, устанавливаемых центром.

Таковыми механизмами являются: распределение материальных ресурсов, выбор тарифной сетки, правил поощрений и штрафных санкций, налоговая политика, механизм стимулирования, выдача кредитов и т.д..

## **1. Примеры имитационных с иерархической структурой**

### **1.1. Пример 1. ИГРА «ВОЙНА и МИР». Межстрановое противоборство**

Разработка игры была выполнена Павловским Ю.Н. [4,5], автор настоящей статьи принимал участие в обсуждении и разработке правил игры и осуществлял проведение конкретных действий за одну из стран В.

Как было сказано, в основу комплекса был заложен объединённый имитационный подход, в рамках которого для описания экономических и военных процессов используются математические модели, а принятие решений осуществляется реальными участниками имитационной игры.

Организатор игры выступал в роли Посредника.

*Посредник*



Структура конструкции игры имела иерархический характер. Роль выделенного игрока исполнял Посредник. Его роль состояла в проведении расчётов экономического и военного состояния стран на основе решений, которые принимались участниками-игроками, и в формировании правил игры. Правила игры относятся к его стратегии.

*Имитационная игра трёх стран. Правила игры трёх стран.*

Рассматривается виртуальный одномерный и замкнутый мир, расположенный на окружности (рис.1).

Государства могут поставлять друг другу мирную и военную продукцию по любой согласованной ими цене, размещать на своей территории производственные мощности и войска соседей, и наоборот, национализировать чужие мощности на своей территории, вступать между собой в союзы, вести войны, заключать мир.

В ходе дипломатических переговоров стороны имеют право, как угодно блефовать и обманывать друг друга, но участники должны оповещать посредников об истинных своих устремлениях.

Экономическое и военное состояния стран в динамике рассчитывалось Посредником на основе модельного их описания ниже.

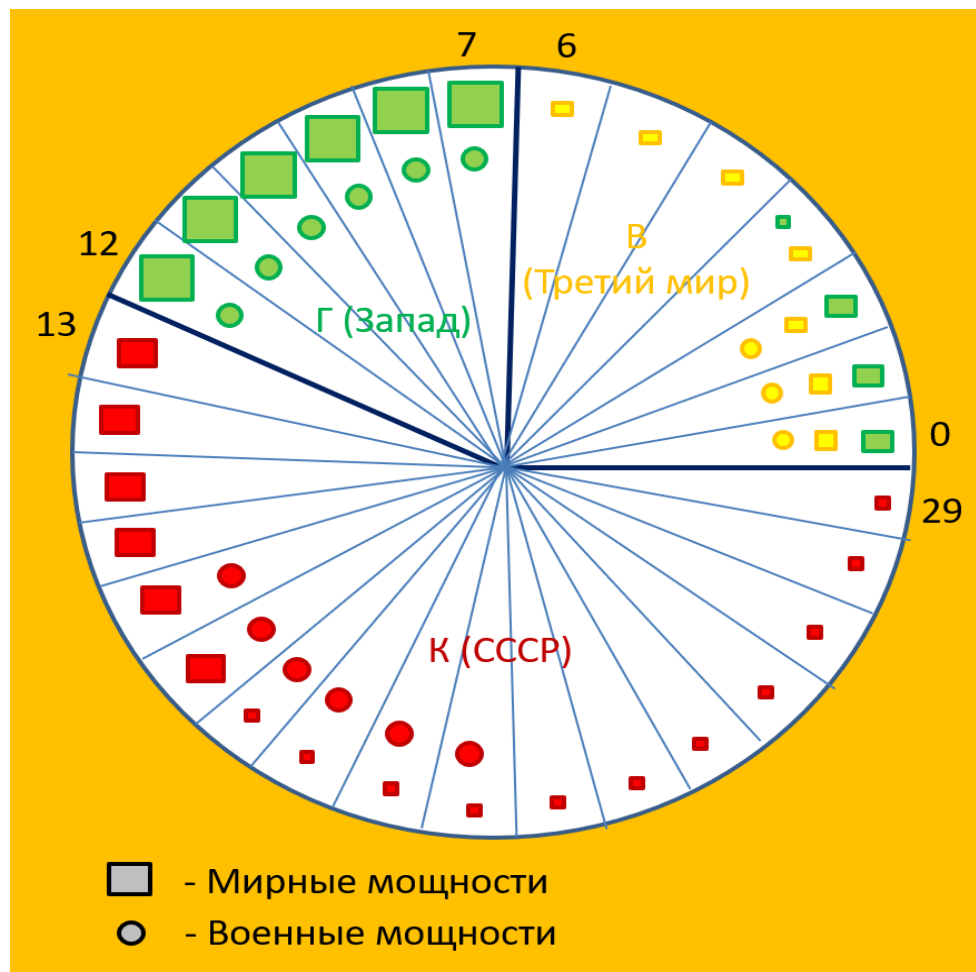


Рис.1. Формализованное представление стран в игре

*Описание экономики*

У каждой из стран создана и развивается собственная экономика. Экономика состоит из двух секторов - мирного и военного. Военный сектор выпускает вооружения, которыми можно было впоследствии воевать. Мирный сектор выпускает высокотехнологичную продукцию, которую можно инвестировать либо в мирный сектор, либо в военный сектор.

Возможны конверсия мощностей и перемещение их в другие сектора. При этом теряется 10% мощностей и 25 дней мощность не производит.

Указанные параметры относятся к выбору Посредника.

Уравнения динамики экономических переменных:

$$P_{\alpha,\beta,i,t+1} = P_{\alpha,\beta,i,t} - \mu_{\alpha,\beta,i} P_{\alpha,\beta,i,t} + \rho_{\alpha,\beta,i} I_{\alpha,\beta,i,t}, \quad T_{\alpha,\beta,i,t+1} = \eta_{\alpha,\beta,i} P_{\alpha,\beta,i,t}.$$

Здесь  $\alpha$  – индекс страны, который пробегает значения Г, В, К;  $\beta$  – индекс сектора экономики, который может принимать значения «мирный» и «военный»;  $i$  номер «географического» сектора –  $0 \leq i \leq 29$ ;  $P_{\alpha,\beta,i,t}$  – производственные мощности;  $T_{\alpha,\beta,i,t+1}$  – выпуск продукции;  $I_{\alpha,\beta,i,t}$  – инвестиции в

развитие производственных мощностей, и, наконец коэффициенты  $\mu_{\alpha,\beta,i}$  – амортизации,  $\rho_{\alpha,\beta,i}$  – фондоемкости, и  $\eta_{\alpha,\beta,i}$  – фондоотдачи.

#### *Цель Посредника*

Функционалом игры у Посредника являлась сумма мощностей в мирном секторе в конечный момент, минус сумма мощностей в мирном секторе в начальный момент, деленная на сумму мощностей в мирном секторе в начальный момент, – кто больше прирастит относительные мощности за время игры. Эта метаяцель – аналог народного блага за время игры.

$$\Phi_{\alpha} = \frac{\sum_i P_{\alpha, \text{мирный}, i, T} - \sum_i P_{\alpha, \text{мирный}, i, 0}}{\sum_i P_{\alpha, \text{мирный}, i, 0}} \rightarrow \max.$$

#### *Стратегии Посредника*

К стратегии Посредника относится и обращение к мыслям Толстого Л.Н. о Войне и Мире. «Сила (количество движения) есть произведение из массы на что-то такое, на какое-то неизвестное X. Военная наука, видя в истории бесчисленное количество примеров того, что масса войск не совпадает с силой, что малые отряды побеждают большие, смутно признает существование этого неизвестного множителя и старается отыскать его в то геометрическом построении, то в вооружении, то –самое обыкновенное – в гениальности полководца. Этот неизвестный X есть дух войска, есть большее или меньшее желание подвергать себя опасностям всех людей, составляющих войско, совершенно независимо от того, дерутся ли люди под командованием гениев или не гениев, в трех или двух линиях, дубинками или ружьями, стреляющими тридцать раз в минуту. Люди, имеющие наибольшее желание драться, всегда поставят себя в наивыгоднейшие условия для драки. Дух войска есть множитель на массу, дающий произведение силы».

#### *Война с применением обычных вооружений*

Можно было воевать друг с другом, что означало, что вооружения сражаются на границе, сражаются не до полной победы или полного поражения. Обычно сражаются до потери боеспособности, а когда она происходит, то понижается уровень операций, из наступления переходят к обороне, из обороны переходят к отступлению. Таким образом движется линия фронта, так идет война обычными вооружениями. Приведем основные формулы, для моделирования боевых действий. Прежде всего, выделим три основные боевые операции: наступление – этой операции припишем ранг 3, оборона – ранг 2, и, наконец, отход – ранг 1. На линии фронта войска ведут боевые действия, испытывая потери в соответствии с уравнениями Осипова-Ланчестера 1 рода, с учетом подвода войск к линии фронта. Коэффициенты эффективности существенно отличаются в наступлении и обороне.

$$\frac{dN}{dt} = -\beta M + X_N, \quad \frac{dM}{dt} = -\alpha N + X_M.$$

Боевые действия идут до потери одной из сторон психологической устойчивости, уменьшение которой коррелирует с относительными потерями стороны за время боя. Потеря устойчивости понижает ранг операции стороны на единицу – образуется новое сочетание операций сторон, некоторые из которых вызывают перемещение линии фронта.

Оценка устойчивости формировалась Посредником в рамках его стратегии под влиянием идей Толстого Л.Н.

Война – это приказ наступать, обороняться или отходить, на одной или на обеих границах. Возможно перемещение вооружений из других секторов к линии фронта.

#### *Война с применением ядерного вооружения*

Еще страны Г и К имели так называемое оружие повышенной мощности. Это не вполне эквивалент ядерному оружию, что-то ближе к тактической его разновидности, оно мощное, но не испепеляющее до конца. Посредником были сформулированы свои правила работы с этим оружием, они определялись реалиями того времени, связанными с аналоговыми системами управления ракет, когда время перенацеливания было больше времени полета. Можно было узнать, что по тебе нанесли удар и либо сразу ответить по уже имеющемуся целераспределению, пока еще ничего не долетело, либо дождаться пока долетит и тем, что останется ударить по новому целераспределению.

Предвосхищая обмен ядерными ударами, страна К произвела перемещение своих мощностей, и нанесла первой ядерный удар. Страна Г ответила так же, ударом.

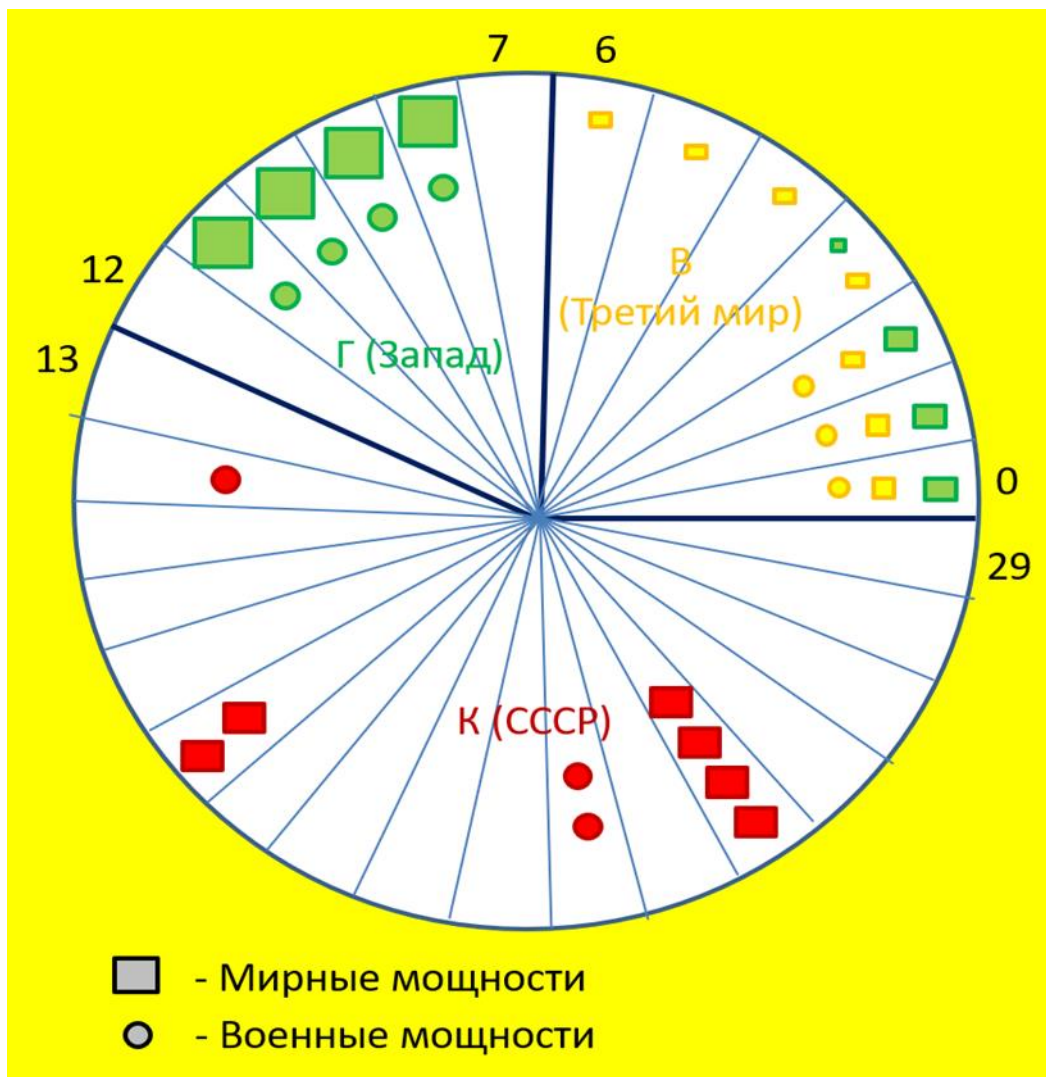


Рис 2. Состояние игры после ядерных ударов

#### Течение игры

В течение 179 шагов в соответствии с Правилами игры Участники проводили дипломатические переговоры, вступали в коалиции, развивали, теряли и восстанавливали экономические потенциалы, обменивались продукцией, перемещали свои мощности, воевали обычным вооружением и оружием повышенной мощности, захватывали и теряли территории.

#### Посредник

Наконец, в условиях значительного снижения духа противодействия у участников имитационной игры, стороны начали склоняться к мирным переговорам, в преддверии которых на 179 день Посредник решил прекратить игру.

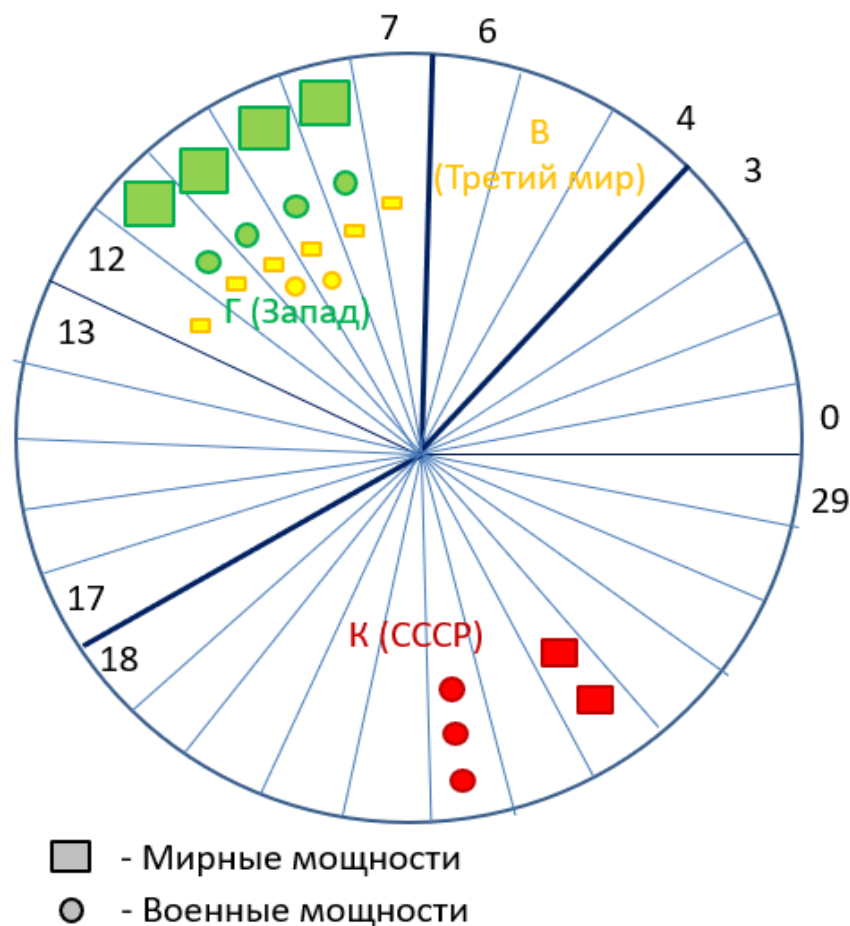


Рис.3 Карта мира в конце игры

Страна В потеряла 7% фондов, 70% вооруженных сил и 3/4 территории. Страна Г потеряла 17% фондов и 13% вооруженных сил, почти в 2 раза (на 5/6) увеличив территорию. Страна К потеряла 25% фондов, 16% вооруженных сил и 1/17 территории (по совокупности, уступив Г часть и приобретя часть за счёт Страны В).

В этом описании Посредник, базируясь на системке уравнений развития процесса, с учётом метацели, на каждом шаге проведения игры может отследить, насколько игроки отклоняются от рациональных выборов в его понимании, т.е. насколько сильно происходит их отклонение от рационального поведения в смысле метацели.

В проведенном реальном эксперименте Посредник выполнял роль пассивного Наблюдателя и внешней стороны для игроков.

Далее, предполагается, что Посредник, решая задачу управления двухуровневой системой с метацелью, описанную ниже, как процедуру иерархического компромисса, сможет проводить активную стратегию в своих интересах, разрешая соответствующую задачу.

По формальному критерию игру выиграла страна В.

*Вывод.*

Проведенная игра показала, что предлагаемая процедура в компьютерном исполнении может быть с успехом использована не только в виде тренажёрного комплекса, но и в реальном процессе принятия решений.

Анализ избранных стратегий игроками позволяет оценить уровень компетенции лиц, принимающих решения, в реальных стратегических условиях.

## 1.2. Пример 2. ЭКОЛОГИЯ. Экологический компромисс.

Имитационная Игра ЭКОЛОГИЯ в форме имитационного вычислительного комплекса была реализована на основе описания модели ниже.

Здесь организатор игры выполнял роль Координатора.

Соответствующее формальное описание далее опирается на глобальную межотраслевую модель, которая была разработана коллективом американских экономистов во главе с В. Леонтьевым [8] в рамках исследований ООН по возможным стратегиям мирового развития и международному экономическому сотрудничеству для определения показателей развития на период 1970-2000 гг.

Описанная далее ситуация взаимоотношения игроков весьма естественно возникает в экологии при анализе и выборе различных стратегий общего мирового развития: на множестве возможных эффективных альтернатив экономического развития отдельных регионов выбрать общую стратегию минимального загрязнения.

По своей структуре модель есть совокупность региональных блоков, связанных балансами товарных и финансовых потоков. Региональный блок состоит из двух частей: балансов затрат-выпуска по отраслям и макроэкономических уравнений. В работах ИЭОПП СО АН СССР и ВЦ АН СССР рассматривались многокритериальные модификации модели Леонтьева [7,9-11].

Дальнейшее рассмотрение ведётся на реализации простейшей модели 4 x 6, в которой мир разбит на два развитых региона (I – Северная Америка и II – остальные развитые страны) и два развивающихся региона (III – Латинская Америка и IV – остальные развивающиеся страны). Макроэкономические переменные модели включают инвестиции  $I$ , капитал  $K$ , занятость  $L$  и потребление  $\lambda$ . Вектор выпуска  $x$  состоит из 4-х товаров, участвующих во внешней торговле (сельское хозяйство, добывающая промышленность и тяжёлая промышленность), отрасли услуг и отрасли очистки от загрязнения. Транспортная отрасль входит в отрасль услуг, которая таким образом, несет затраты на осуществление межрегиональных перевозок. Экспорт и импорт обозначены через  $E = (E_1, \dots, E_4)$  и  $M = (M_1, \dots, M_4)$  соответственно.

Уравнения затрат-выпуска для региона  $s$  принимают вид:

$$x_i^s = \sum_{j=1}^6 a_{ij}^s x_j + \gamma_i^s I^s + c_i^s \lambda^s + \sigma_i^s p^s + E_i^s - M_i^s, \quad i = 1, \dots, 4,$$

$$x_5^s = \sum_{j=1}^6 a_{5j}^s x_j + \gamma_5^s I^s + c_5^s \lambda^s + \sigma_5^s p^s + \sum_{i=1}^4 a_{ij}^s (E_i^s + M_i^s),$$

$$x_6^s = \sum_{j=1}^6 a_{6j}^s x_j + \gamma_6^s I^s + c_6^s \lambda^s + \sigma_6^s p^s.$$

Здесь  $A^s = \| a_{ij}^s \|$  – матрица технологических коэффициентов затрат,  $a_{ij}^s$  – строка транспортных расходов,  $\gamma^s$  – вектор структуры инвестиций. Через  $P^s$  обозначена численность населения  $s$ -го региона; это параметр, который можно варьировать от варианта к варианту.  $c^s$  и  $\sigma^s$  – векторы коэффициентов структуры потребления в зависимости от уровня потребления и численности населения. Кроме того, на выпуски может быть наложено ограничение сверху и снизу

$$x_j \leq \bar{x}_j, \quad j \in \bar{J}, \quad x_j \geq \underline{x}_j, \quad j \in \underline{J}.$$

Здесь в  $\bar{J}$  входят добывающие отрасли, а в  $\underline{J}$  – отрасли, выпускающие конечный продукт.

Макроэкономические ограничения состоят из ограничения по труду, связи выпусков с капиталом и связи капитала с инвестициями:

$$\sum_{j=1}^6 l_j^s x_j + c_l^s \lambda^s + \sigma_l^s p^s \leq L^s,$$

$$\sum_{j=1}^6 k_j^s x_j + c_k^s \lambda^s + \sigma_k^s p^s \leq K^s,$$

$$c_i^s \lambda^s + r^s k^s + \sigma_i^s p^s = I^s.$$

Здесь  $(c_l^s, c_k^s, c_i^s)$  и  $(\sigma_l^s, \sigma_k^s, \sigma_i^s)$  – коэффициенты структуры конечного потребления в зависимости от уровня потребления и численности населения соответственно по трудовым ресурсам, основным фондам и инвестициям;  $l^s$  и  $k^s$  – векторы коэффициентов затрат труда и капитала по отраслям.  $L^s$  – есть общее количество труда, которое в модели фиксировано.

На экспорт и импорт наложено балансовое ограничение:

$$\sum_{i=1}^4 p_i (E_i^s - M_i^s) \geq 0, \quad \sum_{s=1}^4 M_i^s = \sum_{s=1}^4 E_i^s, \quad i = 1, \dots, 4, \quad \text{где } p - \text{вектор цен обмена.}$$

В качестве целевых функций регионов – локальных критериев нижнего уровня принимаются параметры величины потребления  $\lambda^s$ .

*Оптимизационная задача*

Завершим описание модели формулировкой метациели, глобального критерия – суммарного загрязнения:  $F_0 = \sum_{s=1}^4 c^s x_6^s$ .

### 1.3. Пример 3. ЭКОНОМИКА. Стратегическое планирование.

Здесь Организатор игры выполняет роль Планирующего органа= Центра.

Приведём описание схемы имитационной игры, как игрового взаимодействия участников=игроков при выработке Программы производства и Стратегии налогообложения холдингов и предприятий, входящих в Цифровую платформу ОПК при заданном технологическом графе.

Игроками выступают Холдинги.

Отметим, что схема отражает Иерархическую структуру управления.

Здесь ставится вопрос организационно-технологического и финансово-экономического характера: анализируются подходы к оценке возможности выполнения Государственного оборонного заказа (ГОЗ) группой предприятий по выпуску конечных продуктов при заданных финансовых средствах и выработке налоговой политики..

Подчеркнём, что подходы такого типа (на основе «грубых» моделей) позволяют оценить качественные стороны принятия решений. Прежде всего они находят своё эффективное применение при разработке сценариев вычислительных экспериментов для имитационных систем на базе цифровых платформ при большой размерности модельных комплексов.

Организационно система состоит из трёх уровней:

Центр-интегрированные структуры (холдинги)-предприятия.

Проблема принятия решений планирующего органа связана с наличием большого числа неопределённостей и, соответственно, рисков, что предопределяет принятие большого числа предположений и гипотез относительно технологических характеристик в производственном блоке.

При описании далее предприятия, разбитые на  $K$  интегрированных структур, будем нумеровать двойными индексами  $kn$ , где  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) – номер интегрированной структуры,  $n$  – номер предприятия ( $n = 0, 1, \dots, N$ ).

Каждую интегрированную структуру будем отождествлять с ее головным предприятием, за которым зарезервируем индекс  $n = 0$ .

Технологические процессы

Будем рассматривать функционирование системы на отрезке времени  $t = 1, 2, \dots, T$ .

Пусть система способна выпускать  $I$  видов продукции. Обозначим  $U = \mathbb{R}_+^I$ .

*Объёмы и сроки.*

В качестве параметров игры Центр выбирает оценочные объёмы и сроки, т.е. для каждой интегрированной структуры  $k$  задает набор  $(u_1^k, \dots, u_T^k)$  векторов  $u_t^k \in U$ .

В стратегию Центра входит назначение цен продукции, т.е. для каждого момента времени  $t$  выбирается вектор  $p_t \in U$ , таким образом структура  $k$  в момент времени  $t$  получит от Центра за выпуск продукции сумму, равную  $p_t u_t^k$

*Мощности.*

Состояние производственных мощностей предприятия  $kn$  в момент времени  $t$  определяется игроком, как вектор  $x_t^{kn}$  с неотрицательными компонентами. Множество всех таких векторов обозначим через  $X$ . Учитывается динамика мощностей.

В момент времени  $t$  предприятие  $kn$  выбирает вектор  $z_t^{kn}$  вновь создаваемых мощностей. Таким образом, динамика производственных мощностей задается формулой

$$x_{t+1}^{kn} = x_t^{kn} + z_t^{kn}, \quad t = 1, \dots, T, \quad k = 1, \dots, K, \quad n = 0, 1, \dots, N.$$

Начальное значение  $x_0^{kn}$  считается параметром задачи.

За создание новых мощностей предприятие платит сумму  $P_t z_t^{kn}$ . Здесь вектор  $P_t$  с неотрицательными компонентами – параметр модели.

В момент времени  $t$  предприятие  $kn$  выбирает объем выпуска продукции  $v_t^{kn} \in U$ .

*Выпуск продукции*

Производство продукции связано с затратами, эта связь описывается функцией  $\Phi = (\varphi, \phi): X \times U \rightarrow U \times W$ .  $\varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \in U$  – затраты продукции, производимой внутри ОПК, на производство продукции в количестве  $v_t^{kn}$  при наличии мощностей  $x_t^{kn}$ , а  $\phi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \in W$  – затраты на производство той же продукции, продукции, закупаемой извне ОПК.

Управления, выбираемые головным предприятием интегрированной структуры  $k$  должны удовлетворять ограничениям

$$v_t^{k0} + \sum_{n=1}^N \omega_t^{kn0} - \sum_{n=1}^N \omega_t^{k0n} - \varphi(x_t^{k0}, v_t^{k0}) \geq u_t^k, \quad t = 1, \dots, T.$$

Обозначим через  $U_t^{k0}(x_t^{k0}, u_t^k)$  множество наборов

$$(z_t^{k0}, v_t^{k0}, \omega_t^{k00}, \dots, \omega_t^{k0N}, \omega_t^{k10}, \dots, \omega_t^{kNN}) \in X \times U^{N^2+1},$$

удовлетворяющих ограничению

$$v_t^{k0} + \sum_{n=1}^N \omega_t^{kn0} - \sum_{n=1}^N \omega_t^{k0n} - \varphi(x_t^{k0}, v_t^{k0}) \geq u_t^k$$

(здесь для простоты записи принято  $\omega_t^{kn0} = 0, n = 0, 1, \dots, N$ ).

Управления предприятия  $n$  ( $n \neq 0$ ), входящего в интегрированную структуру  $k$  должны удовлетворять ограничениям

$$v_t^{kn} - \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \geq \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{kmm}, t = 1, \dots, T.$$

Обозначим через  $U_t^{kn}(x_t^{kn}, \omega_t^{kn0}, \dots, \omega_t^{knN}, \omega_t^{k0n}, \dots, \omega_t^{kNn})$  множество пар  $(z_t^{kn}, v_t^{kn}) \in X \times U$ , удовлетворяющих условию

$$v_t^{kn} - \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \geq \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{kmm}.$$

*Прибыль и налоги.*

Считаем, что предприятия выплачивают налог с прибыли в размере  $\beta(b_t^{kn})$ , где переменная  $b_t^{kn}$  имеет смысл накопленной прибыли. Вид функции  $\beta$  выбирает Центр.

Считаем, что головное предприятие интегрированной системы является акционером остальных предприятий этой системы и также выплачивает налоги по установленным Центром правилам.

Будем считать, что целью предприятий является максимизация прибыли.

Обозначим для краткости  $\bar{z}^{-kn} = (z_1^{kn}, \dots, z_T^{kn})$ ,  $\bar{v}^{-kn} = (v_1^{-kn}, \dots, v_T^{-kn})$ ,  $\bar{p} = (p_1, \dots, p_T)$ .

Для  $n \neq 0$  прибыль предприятия  $kn$  до налогообложения задается формулой

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T p_t \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} + \sum_{t=1}^T \Pi_t \left( v_t^{kn} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} \right) - \\ & - \sum_{t=1}^T P_t z_t^{kn} - \sum_{t=1}^T p_t \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) - \sum_{t=1}^T \pi_t \phi(x_t^{kn}, v_t^{kn}). \end{aligned}$$

Здесь  $\pi_t$  – вектор цен на товары, закупаемые вне ОПК, а  $\Pi_t$  – вектор цен, по которым предприятия ОПК могут продать свою продукцию на внешнем рынке. Это – параметры модели. Здесь можно считать, что если какой-то вид продукции нельзя купить на внешнем рынке, то его цена просто очень велика, а если продукт какого-то вида нельзя продать вне ОПК, то соответствующая компонента вектора  $\Pi_t$  равна нулю.

Для исчисления прибыли введем дополнительные переменные

$$b_0^{kn} = 0,$$

$$b_t^{kn} = (1 - \tau(t-1))b_{t-1}^{kn} + p_t \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} + \Pi_t \left( v_t^{kn} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} \right) - P_t z_t^{kn} - p_t \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) - \pi_t \phi(x_t^{kn}, v_t^{kn}),$$

$$t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, k, n = 1, \dots, N.$$

Функция времени  $\tau(t)$  описывает периодичность уплаты налогов. Если в момент времени  $t$  происходит выплата налогов, то  $\tau(t) = 1$ , в противном случае  $\tau(t) = 0$ . Таким образом, переменная  $b_t^{kn}$  имеет смысл накопленной прибыли.

Считаем, что предприятия выплачивают налог с прибыли в размере  $\beta(b_t^{kn})$ . Вид функции  $\beta$  выбирает Центр.

Таким образом, цель предприятия состоит в максимизации прибыли после налогообложения, которая при  $n \neq 0$  задается формулой

$$\begin{aligned} g^{kn}(\beta, \bar{p}, \bar{z}^{-kn}, \bar{v}^{-kn}) &= \sum_{t=1}^T p_t \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} + \sum_{t=1}^T \Pi_t \left( v_t^{kn} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} \right) - \\ & - \sum_{t=1}^T P_t z_t^{kn} - \sum_{t=1}^T p_t \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) - \sum_{t=1}^T \pi_t \phi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) - \sum_{t=1}^T \tau(t) \beta(b_t^{kn}). \end{aligned}$$

Считаем, что головное предприятие интегрированной системы является акционером остальных предприятий этой системы. Поэтому его прибыль до налогообложения выражается формулой

$$\sum_{t=1}^T p_t \sum_{m=1}^N \omega_t^{k0m} + \sum_{t=1}^T \Pi_t \left( v_t^{k0} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{k0m} \right) - \sum_{t=1}^T P_t z_t^{k0} - \sum_{t=1}^T p_t \varphi(x_t^{k0}, v_t^{k0}) - \sum_{t=1}^T \pi_t \phi(x_t^{k0}, v_t^{k0}) + \sum_{n=1}^N \alpha^{kn} g^{kn}(z_t^{-kn}, v_t^{-kn}).$$

В этой формуле  $\alpha^{kn}$  – доля головного предприятия в капитале предприятия  $kn$ . В модели это – параметры.

*Информированность и порядок ходов.*

Всем Игрокам в рассматриваемой системе точно известны параметры его блока..

Посредник ориентируется только на информацию, передаваемую ему Игроками.

При задании параметров игры Центр выбирает управления: ресурсы  $\bar{u}^k = (u_1^k, \dots, u_T^k), k = 1, \dots, K$ , цены  $\bar{p} = (p_1, \dots, p_T)$  и функцию  $\beta \in B$  ( $B$  – множество функций  $\beta: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ), и до Холдингов и предприятий доводится информация о сделанном выборе.

Головное предприятие Холдинга выбирает программу  $\bar{u}^{k0} \in \bar{U}^{k0}(\bar{p}, \bar{u}^k)$  и сообщает о своем выборе предприятиям своей интегрированной структуры.

В процессе игры остальные предприятия одновременно и независимо производят свой выбор. Предприятие  $kn$  выбирает свою программу  $u_t^{kn} = (z_t^{kn}, v_t^{kn}), t = 1, \dots, T$ , из множества возможных программ  $\bar{U}^{kn}(\bar{u}^{k0})$ , и сообщает Холдингу.

*Оптимизационная задача Планировщика*

В рамках схемы возможна постановка оптимизационной задачи Центра.

Реализуемость государственного заказа можно трактовать как безубыточность всех предприятий.

Тогда Центр принимает функцию выигрыша

$$g(\beta, \bar{p}, \bar{z}, \bar{z}, \dots, \bar{z}, \dots, \bar{z}, \bar{v}, \bar{v}, \dots, \bar{v}, \dots, \bar{v}) = \\ = \min_{1 \leq k \leq K} \min \left[ g^{k0}(\beta, \bar{z}^{-k0}, \bar{z}^{-k1}, \dots, \bar{z}^{-kN}, \bar{v}^{-k0}, \bar{v}^{-k1}, \dots, \bar{v}^{-kN}), \min_{1 \leq n \leq N} g^{kn}(\beta, \bar{z}^{-kn}, \bar{v}^{-kn}) \right].$$

Где функции  $g(\bullet)$  равняются прибыли предприятий после налогообложения.

Если считать, что все субъекты осторожны к имеющейся у них неопределенности, и при этом они рассчитывают на рациональное поведение своих партнеров, то при заданных значениях программы  $\bar{u}^k = (u_1^k, \dots, u_T^k), k = 1, \dots, K$ , цен  $\bar{p} = (p_1, \dots, p_T)$  и функции  $\beta \in B$  Центр может рассчитывать, что при рациональном поведении партнеров он получит выигрыш не меньший

$$\min_{(u_1^{-10}, u_1^{-11}, \dots, u_1^{-1N}) \in BR^1(\beta, \bar{u}^1)} \dots \min_{(u_1^{-K0}, u_1^{-K1}, \dots, u_1^{-KN}) \in BR^K(\beta, \bar{u}^K)} g(\beta, \bar{p}, \bar{u}^{-10}, \bar{u}^{-11}, \dots, \bar{u}^{-1N}, \bar{u}^{-K0}, \bar{u}^{-K1}, \dots, \bar{u}^{-KN}).$$

Тогда, если величина

$$\sup_{\beta \in B} \sup_{p \in U^T} \min_{(u_1^{-10}, u_1^{-11}, \dots, u_1^{-1N}) \in BR^1(\beta, \bar{u}^1)} \dots \min_{(u_1^{-K0}, u_1^{-K1}, \dots, u_1^{-KN}) \in BR^K(\beta, \bar{u}^K)} g(\beta, \bar{p}, \bar{u}^{-10}, \bar{u}^{-11}, \dots, \bar{u}^{-1N}, \bar{u}^{-K0}, \bar{u}^{-K1}, \dots, \bar{u}^{-KN})$$

положительна, или она неотрицательна и верхняя грань в формуле достигается, то ГОЗ (государственный заказ)  $(\bar{u}^{-1}, \dots, \bar{u}^{-k})$  реализуем.

## Заключение

Перечисленные выше оптимизационные задачи Центра записываются в общем виде.

Пусть ограниченное множество  $X$  задано системой линейных ограничений

$$Ax = b, x \geq 0,$$

где  $A$  – матрица  $m \times n$ ,  $b$  – вектор,  $x \in E^n$ , и имеется  $k$  линейных функционалов  $F_l(x) = (c_l, x), \dots, F_k(x) = (c_k, x)$ .

Задача Центра заключается в том, чтобы найти максимум функции  $F_0(x)$  на множестве Парето для функционалов  $F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)$ , заданных на  $X$ .

Таким образом записывается Процедура иерархического компромисса участников, и выше изложен опыт разработки иерархического компромисса и приводятся примеры описания постановок содержательных задач, целей, информационного пространства и комплекса математических моделей,



которые обеспечивают в совокупности, на основе описанной процедуры, возможность проводить анализ и вырабатывать альтернативы планирования и принятия стратегических решений.

Как следует из предшествующего изложения, проведение имитационных игр может быть использовано для построения рациональных стратегий Центра в стратегических целях в [14-20].

С другой стороны, при выборе реальных стратегий активными участниками операций возможно использование ими иерархического представления процессов в проведении предварительных аналитических оценок будущего.

## Литература

1. Гермейер Ю. Б. Игры с противоположными интересами / С предисловием Н.Н. Моисеева — М.: Наука, 1976. — 328 с.
2. Гермейер Ю.Б., Ватель И.А. Игры с иерархическим вектором интересов // Техническая кибернетика. 1974. № 3. С. 54–69.
3. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Игры с иерархической структурой, Математическая энциклопедия, т.2, М., 1979, с.478-482.
4. Павловский Ю.Н. Имитационные системы и модели. М.: Знание, 1990. 46 с.
5. Белотелов Н.В., Бродский Ю.И., Оленев Н. Н., Павловский Ю.Н. Опыт имитационного моделирования при анализе социально-экономических явлений, М.: МЗ Пресс. 2005, 137 с.
6. Ерешко Ф.И., Чemezov С.В., Турко Н.И. Моделирование взаимодействия стран как инструмент выработки компромиссных политических решений: практика теоретико-игрового подхода.// Межгосударственное противоборство в условиях глобализации и его влияние на управление национальной обороной Российской Федерации: сборник материалов круглого стола (16 августа 2023 г.); ВАГШ ВС РФ. – Москва : Издательский Дом «УМЦ», 2023. – 478 с.
7. Ерешко Ф.И. Математические модели и методы принятия согласованных решений в активных иерархических системах. Диссертация на соиск. уч. степени докт. наук. ИПУ РАН, 1998. – 324 с.
8. Будущее мировой экономики (Доклад группы экспертов ООН во главе с В. Леонтьевым). – М.: Издательство “Международные отношения”, 1979. . – 216 с.
9. Гранберг А.Г., Рубинштейн А.Г. Эксперименты с агрегированной межрегиональной моделью мировой экономики. // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР, серия общественных наук, 1978. – № 6, выпуск. 2. – С. 25–36.
10. Злобин А.С., Меньшиков И.С. Исследование эффективных вариантов развития мировой экономики с помощью диалоговой системы. // Тезисы докладов конференции молодых экономистов и социологов, ч. II, – Новосибирск, 1979. – С. 111–115.
11. Ерешко Ф.И., Злобин А.С. Оптимизация линейной формы на эффективном множестве. // Труды Всесоюзного семинара “Численные методы нелинейного программирования”. – Харьков, 1976. – С. 167–171.
12. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Новые направления в линейном программировании, М., Сов. радио, 1966, – 524 с
13. Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А. Опыт математического моделирования экономики. М.: Энергоатомиздат, 1996. 544 с.
14. Поспелов И.Г. Системный анализ рыночной экономики. Уч. пос. М.: МФТИ, 2018. 142 с.
15. Ерешко Ф.И., Мушков А.Ю., Турко Н.И., Цвиркун А.Д. Управление в крупномасштабных проектах многоукладной экономики. // Автоматика и телемеханика. 2022. № 5. – С. 10213214. Ereshko, F.I., Mushkov, A.Y., Turko, N.I., Tsvirkun A.D., Managing Large-Scale Projects in a Mixed Economy. Autom Remote Control 83, 755–779 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0005117922050083>. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0005117922050083>
16. Ereshko and M. Gorelov , "Prices and Decentralization of Control", // IEEE Xplore Digital Library. 15th International Conference on «Management of Large-Scale System Development» (MLSD'2022), Moscow, Russia, 2022. pp. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD55143.2022.9934208. Scopus. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9933724/proceeding?isnumber=9933990&pageNumber=2>
17. Ereshko F.I., Gorelov M.A., Budzko V.I. An intelligent Approach to Decentralized Control in the Agro-Industrial Complex // Communications in computer and information science. 2022. Vol. 1539. P. 254–264. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-95494-9\\_21](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-95494-9_21) (Ядро РИНЦ, Scopus).
18. Ereshko, F., Kamenev, I., Shimansky, A. (2022). Economic Modeling of the Impact of Human Capital on Economic Growth and Competitiveness. In: Gibadullin, A. (eds) Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 432. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97730-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97730-6_1)
19. Felix Ereshko, Elena Karanina, A systematic approach to the diagnosis of economic security of a transport enterprises, Transportation Research Procedia, Volume 63, 2022, Pages 322-328, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.019>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522002745>.
20. Ерешко, Ф. И. Управление в искусственных нейронных сетях // Информатика: проблемы, методы,

технологии: материалы XXIII Международной научно-практической конференции им. Э.К. Алгаинова, Воронеж, 15–17 февраля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 4-26. – EDN LRCYWK.

# ПРОБЛЕМА КОДИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ АКТИВНЫМИ АГЕНТАМИ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Жилякова Л.Ю.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
zhilyakova@ipu.ru

*Аннотация.* Предложена модель активного агента с внутренней структурой, способного генерировать ритмическую активность с некоторым интервалом. Структура агента представлена сетью из тех узлов: полуцентрального осциллятора и узла-триггера с памятью, который, возбуждаясь, передает активность агенту. Зависимость интервала от параметров внутренней сети найдена аналитически.

*Ключевые слова:* ритмическая активность, кодирование времени, полуцентральный осциллятор, активная сетевая структура.

## Введение

В работе предложена модель агента с внутренней сетевой структурой, способного запоминать временные интервалы. Моделированию временного кодирования нейронными ансамблями посвящено большое количество исследований. Отдельные «нейроны времени» (time cells) и ансамбли нейронов, отвечающих за запоминание интервалов и временных последовательностей, находят в различных участках мозга: гиппокампе [1, 2], латеральной энторинальной коре [3], медиальной энторинальной коре [4], мозжечке [5], а некоторые исследователи даже выносят восприятие времени за пределы мозга [6]. Однако в настоящем исследовании нас будут интересовать работы, посвященные не столько нейробиологическим коррелятам временного кодирования, сколько его моделированию.

Самой первой моделью кодирования времени принято считать *модель внутренних часов* М. Трейсмана [7], предложенную им в 1963 г. Эта модель состояла из трех блоков: пейсмейкер, накопитель и модуль памяти. Приходящий сигнал замыкал связь между пейсмейкером и накопителем, который начинал накопление тактов до завершения сигнала. После чего, значение длительности сигнала передавалось в память для хранения и сравнения с другими длительностями. Эта модель имела существенный недостаток: она не удовлетворяла закону Вебера, или так называемому *скалярному свойству*, справедливому для запоминания времени живыми организмами. Согласно ему, точность, с которой субъективно оценивается заданная длительность, уменьшается обратно пропорционально величине этой длительности. Расширением этой модели стала *теория скалярного ожидания*, предложенная Дж. Гиббоном в [8] и дополненная Р.М. Чёрчем в [9]. В работе [10], опубликованной в 2020 г., теория скалярного ожидания названа самой влиятельной моделью синхронизации и запоминания временных интервалов животными на сегодняшний день. Она расширяет модуль памяти во внутренних часах Трейсмана. В него добавлены *рабочая память*, *долговременная (референтная) память* и правило принятия решения для определения того, похожа ли измеряемая длительность на ранее закодированную длительность («да» или «нет»). Ключевым в этой модели является процесс принятия решений, который управляет синхронизацией. Пока животное отсчитывает некоторый интервал, оно постоянно сравнивает текущее время (хранящееся в рабочей памяти) с ожидаемым временем (хранящимся в референтной памяти). Чтобы выполнить это сравнение, оно вычисляет *отношение* двух значений; когда отношение близко к единице, оно реагирует. Используя отношение текущего времени к ожидаемому времени, а не, например, просто вычитая одно из другого, модель учитывает ключевое наблюдение о времени животных и человека: это *скалярное свойство*, которое дало название модели. Изменчивость суждений о времени линейно возрастает со средней оценкой интервала, т.е. чем больше оцениваемый временной интервал, тем больше и разница между минимальной и максимальной оценкой.

Модель, предложенная в настоящей работе, является продолжением работы [11], в которой была предложена модель нейроноподобного агента с внутренней структурой. Эта модель, в свою очередь, базируется на модели гетерохимического взаимодействия нейронов в малых ансамблях, разработанной в [12, 13]. В [13] с помощью предложенного подхода был построен ряд моделей центральных генераторов паттерна простых живых организмов. В [14] предложена модель переключения походки шестиногого робота с помощью эффекта нейромодуляции.

Текущее исследование посвящено аналитическому решению задачи кодирования временного интервала агентом с внутренней сетевой структурой. Здесь под интервалом будем понимать длительность между двумя последующими активациями агента. Будет представлено решение прямой и обратной задачи. Прямая задача заключается в нахождении зависимости величины интервала активации агента от его внутренних параметров, обратная задача – в поиске значений параметров для воспроизведения заданного временного интервала.

## 1. Эндогенно активные агенты и их внутренняя динамика

Будем рассматривать агентов, которые активизируются через определенные промежутки времени. Эта активация инициируется процессами, происходящими внутри агента. В предложенной модели эти процессы описываются сетью из трех элементов.

### 1.1. Внутренняя сеть агента

Внутренняя сеть агента состоит из полуцентрального осциллятора с возбуждающими связями и третьего элемента, триггера, на который они воздействуют по очереди каждый такт дискретного времени  $t$ . Триггер, в свою очередь, заставляет активизироваться агента. Схема сети представлена на рисунке 1.

Сеть функционирует в дискретном времени следующим образом: каждый такт времени  $t$  активен один из элементов осциллятора; на такте  $t + 1$  он активирует второй элемент посредством возбуждающей связи, отключаясь сам. Кроме того, оба эти элемента передают возбуждение на триггер с весами  $w_1$  и  $w_2$  соответственно. Триггер, помимо весов входных связей, имеет еще две характеристики: память и порог активации. Счетчик тактов с соответствующими весами накапливается в памяти с учетом коэффициента дисконтирования  $\mu \in (0, 1]$ , моделирующего забывание. Как только накопленная память превышает пороговое значение  $Th$ , триггер активизируется, активируя при этом самого агента.

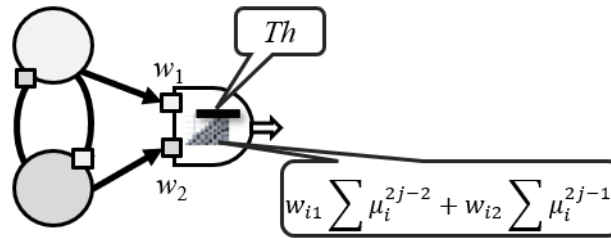


Рис. 1. Внутренняя сеть агента и ее параметры

Следует отметить, что если для  $\mu$  выполняется строгое неравенство  $\mu < 1$ , то память ограничена сверху некоторым значением  $U^\infty$ , формула для которого будет приведена ниже. Это означает, в частности, что если порог больше этого значения:  $Th > U^\infty$ , то агент будет всегда пассивным, но при этом, «готовым к активации»: в отличие от полностью пассивного агента с высоким порогом, он сможет активизироваться от малого внешнего воздействия.

### 1.2. Параметры сети

Параметры сети агента  $i$  определяются набором параметров его триггера:  $\{\mu_i, Th_i, w_{i1}, w_{i2}\}$ . Память накапливается в виде потенциала  $U_i(t)$  по формуле

$$U_i(t) = \begin{cases} w_{i1} \sum_{j=1}^{\frac{t}{2}} \mu_i^{2j-1} + w_{i2} \sum_{j=1}^{\frac{t}{2}} \mu_i^{2j-2}, & \text{if } t = 2k, \\ w_{i1} \sum_{j=1}^{\frac{t+1}{2}} \mu_i^{2j-2} + w_{i2} \sum_{j=1}^{\frac{t-1}{2}} \mu_i^{2j-1}, & \text{if } t = 2k - 1, k \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что при  $\mu < 1$  память накапливается в виде сумм бесконечно убывающих геометрических прогрессий.

Без ограничения общности примем, что  $w_{i1} = w_{i2} = w_i$ . Тогда суммы в обеих строках сходятся к одному и тому же значению

$$U_i^\infty = \frac{w_i}{1-\mu_i}. \quad (2)$$

## 2. Прямая и обратная задачи кодирования временных интервалов

Если для порогового значения агента выполняется неравенство  $Th_i < U_i^\infty$ , он будет активизироваться с некоторым интервалом времени  $T$ .

*Прямой задачей* будем называть задачу определения длины интервала активации по параметрам  $\{\mu_i, Th_i, w_{i1}, w_{i2}\}$ . *Обратная задача* состоит в том, чтобы для данного интервала  $T$  подобрать набор параметров агента, при которых он будет активизироваться с этим интервалом.

## 2.1. Решение прямой задачи

Пусть веса рецепторов триггера равны и фиксированы:  $w_{i1} = w_{i2} = w_i$ .

Пусть также заданы параметры  $Th_i$  и  $\mu_i$ , причем, для порогового значения  $Th_i$  выполняется условие  $Th_i < U_i^\infty$ .

Как часто (через какие промежутки времени) агент будет активироваться? Условие активации агента можно записать в следующем виде:

$$T = \underset{x}{\arg \min} (\sum_{j=1}^x w_i \mu_i^{j-1} \geq Th_i). \quad (3)$$

Свернув сумму в формуле (3), получим:

$$w_i \frac{1 - \mu_i^x}{1 - \mu_i} \geq Th_i. \quad (4)$$

Отсюда:

$$x \geq \log_{\mu_i} \left( \frac{1 - \mu_i}{w_i} Th_i + 1 \right). \quad (5)$$

Поскольку время в модели дискретно, а  $T$  – наименьшее целое число, удовлетворяющее неравенству (5), имеем:

$$T = \left\lceil \log_{\mu_i} \left( \frac{1 - \mu_i}{w_i} Th_i + 1 \right) \right\rceil. \quad (6)$$

## 2.2. Решение обратной задачи

Обратная задача представляет больший интерес, поскольку позволяет агенту запоминать временные интервалы различной длительности, варьируя свои параметры.

Пусть дан временной интервал  $T$ . Какой набор параметров  $\{\mu_i, Th_i, w_i\}$  должен быть у агента, чтобы период его активаций был равен  $T$ ?

Поскольку параметры являются зависимыми, будем считать, что изменяется пороговое значение  $Th_i$ . Его можно найти по формуле:

$$\sum_{j=1}^{T-1} w_i \mu_i^{j-1} < Th_i \leq \sum_{j=1}^T w_i \mu_i^{j-1}, \quad (7)$$

откуда следует, что

$$Th_i = w_i \frac{1 - \mu_i^T}{1 - \mu_i}. \quad (8)$$

Таким образом, для заданного значения  $T$  всегда существует  $Th_i$ , гарантированно меньшее  $U_i^\infty$ .

## 3. Обсуждение результатов

Предложенная модель имеет структурное сходство с моделью внутренних часов Трейсмана и ее расширением, теорией скалярного ожидания, описанными во введении. Здесь также присутствует пейсмейкер, задающий отсчет моментов времени, в данной модели он реализован с помощью полцентрового осциллятора; накопитель реализован с помощью триггера, а модуль памяти представлен пороговым значением.

Отметим, что скалярное свойство (уменьшение точности запоминания с увеличением интервала) в модели реализуется естественным образом за счет эффекта забывания. Иллюстрация этого эффекта приведена на рис. 2. Из представленных данных видно, что разница между двумя последующими значениями  $U_i(T-1)$  и  $U_i(T)$  уменьшается с увеличением  $T$ . Это означает, что отклонение на некоторую величину  $\Delta U_i$  приведет к значительно большему смещению относительно  $T$ . Так, при  $w_i = 1$ ,  $\mu_i = 0.9$  значения  $U_i(T)$  в моменты времени 57 и 58 совпадают с точностью до второго знака, а в моменты 99 и 100 совпадают до четвертого знака, то есть, с точки зрения памяти, неразличимы.

$$w = 1, \mu = 0.9 \quad U^\infty = 10$$

$T$	$U(T)$
1	1
2	1.9
...	
9	6.13
10	6.51
...	
57	9.97535
58	9.97791
...	
99	9.999705
100	9.999734

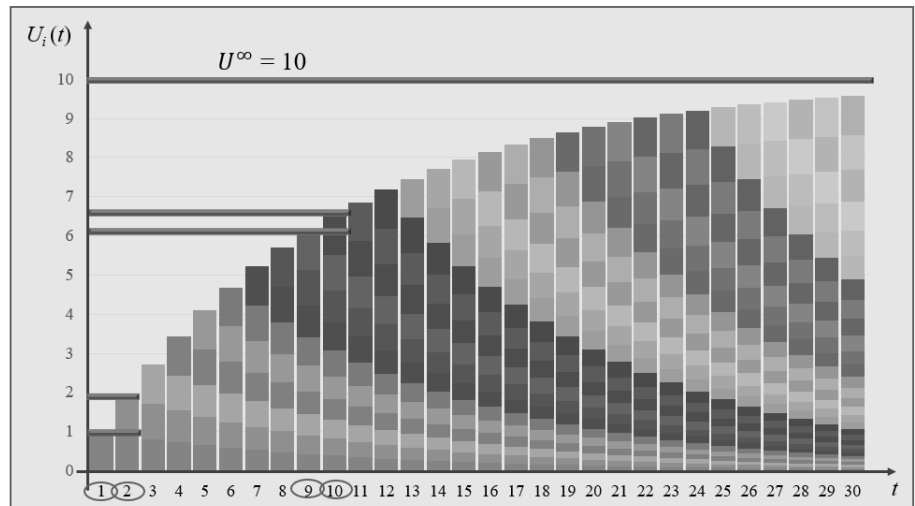


Рис. 2. Выполнение скалярного закона в модели: чем больше значение  $T$ , тем уже зазор между последующими значениями накопленной памяти  $U(T - 1)$  и  $U(T)$

## 5. Заключение

В докладе представлены решения прямой и обратной задач запоминания интервала нейроноподобным агентом. Однако это только начало большого исследования, поскольку для воспроизведения некоторого заданного интервала его необходимо сначала воспринять. Задача восприятия является гораздо более сложной, однако мы надеемся реализовать ее, расширив предложенную модель.

Второе направление дальнейших исследований: имитационное моделирование, с помощью которого станет возможным исследовать поведение больших скоординированных групп таких агентов, что позволит приблизить модель к биологическим реалиям и реализовать несколько свойств, присущих запоминанию временных интервалов животными и людьми. Во-первых, это сделает запоминание устойчивым, во-вторых, привнесёт в модель шум, который во многих случаях оказывается полезным для биологических организмов.

Кроме того, за счет эндогенной активности агентов и склонности измененных параметров возвращаться к своим гомеостатическим значениям мы планируем реализовать тенденцию отклонения длительности запомненных интервалов к средним показателям, которая наблюдается в экспериментах (см., напр., [5]).

## Литература

1. MacDonald, C. J., Lepage, K. Q., Eden, U. T., & Eichenbaum, H. Hippocampal “time cells” bridge the gap in memory for discontinuous events. *Neuron*, 71(4), 737-749. (2011).
2. Reddy, L., Zoefel, B., Pospel, J. K., Peters, J., Dijksterhuis, D. E., Poncet, M., ... & Self, M. W. Human hippocampal neurons track moments in a sequence of events. *Journal of Neuroscience*, 41(31), 6714-6725 (2021).
3. Montchal, M.E., Reagh, Z.M. & Yassa, M.A. Precise temporal memories are supported by the lateral entorhinal cortex in humans. *Nat Neurosci* 22, 284–288 (2019).
4. Dias, M., Ferreira, R., & Remondes, M. Medial entorhinal cortex excitatory neurons are necessary for accurate timing. *Journal of Neuroscience*, 41(48), 9932-9943 (2021).
5. Narain, D., Remington, E.D., Zeeuw, C.I.D. et al. A cerebellar mechanism for learning prior distributions of time intervals. *Nat Commun* 9, 469 (2018).
6. Robbe D. Lost in time: Relocating the perception of duration outside the brain: *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, V. 153, 105312 (2023).
7. Treisman, M. Temporal discrimination and the indifference interval. Implications for a model of the “internal clock.” *Psychol. Monogr.* 1963. 77, 1–31.
8. Gibbon, J. Scalar expectancy theory and Weber’s law in animal timing. *Psychol. Rev.* 1977. 84, 279–325.
9. Church, R.M. Properties of the internal clock. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1984. 423, 566–582.
10. Talbot L., Doyère V. Neural encoding of time in the animal brain: *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2020, V. 115, P. 146-163.
11. Zhilyakova, L. (2023). Modeling Neuron-Like Agents with a Network Internal Structure. In: Kryzhanovsky, B., Dunin-Barkowski, W., Redko, V., Tiumentsev, Y., Klimov, V. (eds) *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and*

Cognitive Research VII. NEUROINFORMATICS 2023. Studies in Computational Intelligence, vol 1120. Springer, Cham. P. 300–307.

12. Кузнецов О.П., Базенков Н.И., Болдышев Б.А., Жиякова Л.Ю., Куливец С.Г., Чистопольский И.А. Асинхронная дискретная модель химических взаимодействий в простых нейронных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. М.: Изд. ФИЦ «Информатика и управление» РАН, № 2, 2018. С. 3-20.
13. Vazhenkov N.I., Boldyshev B.A., Dyakonova V.E., Kuznetsov O.P. Simulating Small Neural Circuits with a Discrete Computational Model: Biol Cybern 114, 349–362 (2020).
14. Болдышев Б.А., Жиякова Л.Ю. Нейромодуляция как инструмент управления нейронными ансамблями // Проблемы управления. 2021. 2. С. 76-84.

# ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ СЕТЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ С МОДУЛЯРНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ, ГЕТЕРОГЕННЫМИ АГЕНТАМИ И РАНЖИРОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ<sup>3</sup>

Козицин И.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
kozitsin.ivan@mail.ru

*Аннотация.* Поставлена задача управления мнениями агентов. Управляющий субъект стремится повлиять на общественное мнение путем настройки алгоритма ранжирования, который модерирует коммуникации между агентами. Задача управления базируется на приближении среднего поля для SCARDO-модели и учитывает модулярность сетевой структуры и гетерогенность активности агентов.

*Ключевые слова:* SCARDO-модель, модулярные топологии, гетерогенные агенты, алгоритмы ранжирования, оптимальное управление.

## Введение

Сетевыми интервенциями называют стратегические воздействия на активную сетевую структуру с целью повлиять на ее состояние [1]. Канонически выделяют интервенции, направленные на изменения свойств вершин (к примеру, мнений пользователей социальных медиа-платформ) [2] и интервенции, направленные на изменения структуры сети (институциональные воздействия на организационные структуры; более “мягкий” пример – работа алгоритмов рекомендации новых друзей в онлайн-социальных сетях) [3]. Вместе с тем все большее внимание научного сообщества приковано к алгоритмам ранжирования и персонализации контента (далее – алгоритмы ранжирования), которые модерируют информационные потоки в социальных медиа платформах, опираясь на цифровые следы пользователей, их характеристики и интересы, в том числе их мнения [4]. В связи с этим целесообразно рассмотреть еще один вид интервенций – интервенции, направленные на изменение структуры информационных потоков путем корректировки алгоритмов ранжирования. В данной работе будет поставлена задача управления мнениями агентов, в которой управляющий субъект стремится повлиять на общественное мнение путем настройки алгоритма ранжирования контента. Задача управления ставится в контексте разработанного ранее приближения среднего поля для SCARDO-модели динамики мнений и учитывает модулярность сетевой структуры и гетерогенность активности агентов в ней [5].

## 1. Модель

Рассмотрим структурированную социальную систему из  $N$  агентов, связанных социальной сетью  $G = (V, E)$ , где  $V = \{1, \dots, N\}$  – множество вершин (агентов), а  $E \subseteq V \times V$  – множество ребер между ними. Каждый агент характеризуется мнением из множества  $Z = \{Z_1, \dots, Z_m\}$  и типом из множества  $\Xi = \{\Xi_1, \dots, \Xi_M\}$ . При этом мнения могут меняться, а типы агентов считаются постоянными. В каждый момент времени  $t = 1, 2, 3, \dots$  случайным образом на основании наперед заданного на множестве агентов распределения активностей  $\{\pi_1, \dots, \pi_N\}$  выбираются агент (пусть  $i$ ) и один из его соседей по социальной сети (пусть  $j$ ). После этого  $j$  влияет на  $i$ . Пусть мнения агентов  $i$  и  $j$  есть  $x_i(t) = Z_s, x_j(t) = Z_l$ , а типы –  $\xi_i = \Xi_f, \xi_j = \Xi_r$  соответственно. Мнение агента  $i$  обновляется (или остается неизменным) в соответствии с вероятностным распределением  $\{p_{s,l,1}^{f,r}, \dots, p_{s,l,m}^{f,r}\}$ , где  $p_{s,l,k}^{f,r}$  – вероятность того, что мнение агента  $i$  примет значение  $Z_k$ . При этом выполнено  $p_{s,l,1}^{f,r} + \dots + p_{s,l,m}^{f,r} = 1$ . Для простоты будем считать, что параметры активности агентов определяются их типами.

Структура социальной сети задается стохастической блочной моделью, в которой блоки соответствуют типам агентов. Пусть  $f \in [M]$  и  $r \in [M]$  – индексы блоков. Величина  $\rho_{f,r} \in [0, 1]$  задает вероятность формирования связи между двумя произвольными вершинами из соответствующих блоков. Отметим, что при  $f = r$  речь идет о формировании связей внутри одного блока.

Дополнительно вводится  $(M + 1)$ -й тип агентов, которые невосприимчивы к социальному влиянию и характеризуются параметром активности  $\pi_{M+1}$ . Для агентов с данным типом имеет место  $p_{s,l,k}^{M+1,r} = 0$  при  $s \neq k$ . Содержательная интерпретация таких агентов – боты, аккаунты СМИ или рекламные сообщения в социальных медиа (далее – агенты-боты). Остальных агентов будем называть нативными агентами. Агенты-боты разбиваются на группы (когорты), каждая когорта взаимодействует со своим типом нативных агентов. Такая конфигурация сети позволяет учесть таргетированность реальных ботов или рекламных сообщений в социальных медиа. Для моделирования таких контактов также будем использовать стохастическую блочную модель, в которой блоками выступают типы нативных агентов и

<sup>3</sup> Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ), проект № 24-71-00070



“нацеленные” на них когорты ботов. Вероятность формирования связи между нативным агентом с типом  $\Xi_r$  и ботом из соответствующей когорты будем описывать параметром  $\rho^r \in [0,1]$ .

Будем считать, что связи между обычными агентами статичны, в то время как составы когорт могут меняться со временем, как и структура связей между ботами и нативными агентами (эта динамика операционализируется при помощи изменения величин  $\rho^r$ ) – боты адаптивны. Предполагаем, что мнения ботов, составы их когорт и структура связей с нативными агентами задаются экзогенно.

Коммуникации агентов модерируются алгоритмом ранжирования  $\Delta$ , который запрещает контакт между двумя агентами  $i$  и  $j$  (пусть второй влияет на первого) с мнениями  $x_i(t) = Z_s, x_j(t) = Z_l$  и типами  $\xi_i = \Xi_f, \xi_j = \Xi_r$  с заданной вероятностью  $\Delta_{s,l}^{f,r}$ .

## 2. Приближение среднего поля

Для представленной выше модели в работе [5] в предположении  $N \rightarrow \infty$  было построено приближение среднего поля, описывающее динамику численностей сторонников различных мнений с учетом их типов. Пусть  $\tau$  – масштабированное время:  $\tau = \frac{t}{N}, \delta\tau = \frac{1}{N}$ . Пусть  $y_{a,f}(\tau)$  – доля (относительно числа всех агентов) адептов мнения  $Z_a$  с типом  $\Xi_f$  ( $f \in [M]$ ) в момент времени  $\tau$ . Пусть  $u_l^f(\tau)$  – доля (относительно числа всех агентов) ботов из когорты  $f \in [M]$  с мнением  $Z_l$  в момент времени  $\tau$ . Пусть

$$A = \frac{1}{N} \left[ \sum_{f \in [M]} N_f \pi_f + U \pi_{M+1} \right],$$

где  $N_f$  – число нативных агентов с типом  $\Xi_f$ , а  $U$  – число ботов. Пусть

$$B_f(\tau) = \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{r \in [M]} N_r \pi_r \rho_{f,r} - \pi_f \rho_{f,f} + U^f(\tau) \pi_{M+1} \rho^f \right],$$

где  $U^f(\tau)$  – численность когорты с индексом  $f$  (взаимодействующей с агентами, имеющими тип  $\Xi_f$ ). Пусть

$$D_a^f(\tau) = \sum_{l \in [m]} \sum_{r \in [M]} y_{l,r}(\tau) \pi_r \rho_{f,r} \Delta_{a,l}^{f,r} + \sum_{l \in [m]} u_l^f(\tau) \pi_{M+1} \rho^f \Delta_{a,l}^{f,M+1},$$

Тогда имеет место следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dy_{a,f}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{A B^f(\tau)} \left[ \sum_{s \in [m]} \sum_{l \in [m]} y_{s,f}(\tau) \pi_f C_{s,l,a}^f(\tau) - y_{a,f}(\tau) \pi_f D_a^f(\tau) \right],$$

$$a \in [m], f \in [M]. \quad (1)$$

## 3. Управление мнениями путем настройки алгоритма ранжирования

Пусть субъект управления имеет цель изменить распределение мнений в системе, определяемое набором переменных

$$y_1(\tau) = \sum_{f \in [M]} y_{1,f}(\tau), \dots, y_m(\tau) = \sum_{f \in [M]} y_{m,f}(\tau).$$

Будем считать, что субъект управления действует в рамках конечного горизонта планирования  $T$ . Аналогично работе [6] будем предполагать, что функционал качества линеен и описывается следующим выражением (без ограничения общности считаем, что система начинает динамику при  $\tau = 0$ ):

$$J = C \int_0^T [v_1 y_{1,f}(\tau) + \dots + v_m y_{m,f}(\tau)] d\tau + v_1 y_{1,f}(T) + \dots + v_m y_{m,f}(T), \quad (2)$$

где параметр  $C > 0$  описывает относительную важность интегрального слагаемого функционала, а неотрицательный вектор  $v = (v_1, \dots, v_m)$  характеризует предпочтения субъекта управления касательно распределения мнений в системе. Чем больше  $v_k$ , тем менее желательно присутствие в системе агентов с мнением  $Z_k$ .

Цель субъекта управления – минимизировать функционал качества (2). Для этого субъект управления настраивает алгоритм ранжирования  $\Delta$ , задаваемый параметрами  $\Delta_{a,l}^{f,r}$  ( $a, l \in [m], f \in [M], r \in [M + 1]$ ). Таким образом, имеет место следующая задача управления:

$$\begin{aligned} J &\rightarrow \min_{\Delta} \\ \text{subject to: Eq. (1),} \\ y_{a,f}(0) &= q_{a,f}, \quad a \in [m], f \in [M], \\ 0 \leq \Delta_{a,l}^{f,r} &\leq 1, \quad a \in [m], f \in [M + 1]. \end{aligned}$$

где величины  $q_{a,f}$  задают начальное состояние системы (распределение нативных агентов по мнениям и типам). Они удовлетворяют естественным ограничениям:

$$0 \leq q_{a,f} \leq 1, \quad \sum_{a \in [m]} q_{a,f} = \frac{N_f}{N}.$$

Более содержательная постановка заключается в рассмотрении ограничений общего вида на параметры алгоритма ранжирования:

$$\begin{aligned} J &\rightarrow \min_{\Delta} \\ \text{subject to: Eq. (1),} \\ y_{a,f}(0) &= q_{a,f}, \quad a \in [m], f \in [M], \\ \alpha \leq \Delta_{a,l}^{f,r} &\leq \beta, \quad a \in [m], f \in [M + 1], \end{aligned}$$

где  $0 \leq \alpha \leq \beta \leq 1$ .

## 5. Заключение

В данной работе была поставлена задача управления мнениями агентов, в которой управляющий субъект стремится повлиять на общественное мнение путем настройки алгоритма ранжирования контента, который модерирует коммуникации между агентами. Задача управления базируется на разработанном ранее приближении среднего поля для SCARDO-модели динамики мнений и учитывает модулярность сетевой структуры и гетерогенность активности агентов в ней. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение ее свойств и решение.

## Литература

1. Valente T. W. Network Interventions: Using Social Networks to Accelerate Diffusion of Innovations // The Sage Handbook of Social Network Analysis. – 2023. – P. 282. DOI: 10.1126/science.1217330.
2. Hunter R. F. et al. Social network interventions for health behaviours and outcomes: A systematic review and meta-analysis // PLoS medicine. – 2019. – Vol. 16. – N 9. – P. e1002890. DOI: 10.1371/journal.pmed.1002890
3. Petrov I. V. Structural interventions in linear best-response games on random graphs // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – Vol. 56. – N 2. – P. 2830–2833. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1396
4. Ibrahim H. et al. YouTube’s recommendation algorithm is left-leaning in the United States // PNAS nexus. – 2023. – Vol. 2. – N 8. – P. pgad264. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgad264
5. Gezha V. N., Kozitsin I. V. Macroscopic Description of Structured Heterogeneous Online Social Systems with Dynamical Opinions // 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.33276.96640.
6. Kozitsin I. V. Optimal control in opinion dynamics models: diversity of influence mechanisms and complex influence hierarchies // Chaos, Solitons & Fractals. – 2024. – Vol. 181. – P. 114728. DOI: 10.1016/j.chaos.2024.114728

# ЗАДАЧА СТИМУЛИРОВАНИЯ В РЕФЛЕКСИВНОЙ ИГРЕ С ТОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ИНФОРМИРОВАННОСТИ

Петров И.В., Чхартишвили А.Г.

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

ivpetrov@ipu.ru, sandro\_ch@mail.ru

*Аннотация.* В центре внимания данной работы – рефлексивные игры с точечной структурой информированности: показано, что информационное равновесие в таких играх аналогично равновесию Нэша в игре на сети с линейным наилучшим ответом и может быть сформулировано в терминах структуры информированности: в явном виде записаны выражения для равновесных ответов игроков, указаны условия существования и единственности равновесий.

*Ключевые слова:* рефлексивные игры, информационное равновесие, игры на сетях, сетевое управление.

## Введение

Информационная рефлексия – процесс и результат размышлений агента о том, каковы значения неопределенных параметров, что об этих значениях знают и думают его оппоненты (другие агенты) [1]. Информационная рефлексия обычно связана с недостаточной взаимной информированностью, и ее результат используется при принятии решений. Одним из способов моделирования принятия решения в ситуации с неполной информированностью являются рефлексивные игры, в которых представления агентов друг о друге формализованы в виде фантомных агентов.

Удобным инструментом исследования концепции решения рефлексивной игры – информационного равновесия – является граф рефлексивной игры, в котором вершины соответствуют реальным и фантомным агентам и в каждую вершину-агента входят дуги (их число на единицу меньше числа реальных агентов), идущие из вершин-агентов, от действий которых в субъективном равновесии зависит выигрыш данного агента. Ниже на примере рефлексивной игры Курно показано, что в отдельных случаях, а именно – в случаях, когда наилучшие ответы игроков линейно зависят от других, связанных с ними агентов, информационное равновесие может быть описано в явном виде в терминах структуры информированности.

Для класса игр с линейным наилучшим ответом ранее [2] была сформулирована задача управления стимулами агентов – англ. *incentive targeting problem* – случай задачи центра, изменяющего параметр функции полезности агентов, являющийся их предельным выигрышем и не зависящий от действий других агентов. В случае рефлексивной игры с точечной структурой информированности изменение данного параметра возможно двумя способами, каждый из которых может быть реализован различными методами: единовременное сообщение нового параметра всем агентам (что эквивалентно решению исходной задачи стимулирования), либо ситуация, в которой о значении нового параметра узнает лишь часть агентов. В данной работе приведен пример механизма сообщения информации центром, когда две эти ситуации – случай общего знания и случай неполной информированности агентов дают эквивалентный ответ.

## 1. Рефлексивные игры и структура информированности агентов

Рефлексивная игра  $\Gamma_I$  с конечной структурой информированности  $I$  задается кортежем  $\Gamma_I = \{N, (X_i)_{i \in N}, f_i(\cdot)_{i \in N}, G_I\}$ , где  $N$  – множество реальных агентов,  $X_i$  – множество допустимых действий  $i$ -го реального агента,  $\Theta$  – множество возможных значений неопределенного параметра («состояний природы»),  $f_i(\cdot): \Theta \times X^N \rightarrow \mathbb{R}^1$  – целевая функция  $i$ -го реального агента,  $i \in N$ ,  $G_I$  – граф рефлексивной игры.

Граф рефлексивной игры, вершины которого представляют агентов, а связи – их взаимные представления друг о друге, состоит из следующих элементов:

- $A_i$  – множество вершин, соответствующих возможным экземпляры  $i$ -го агента,  $i \in N = \{1, \dots, n\}$ ; ровно один из них является реальным, прочие являются фантомными агентами;
- $A = A_1 \cup \dots \cup A_n$  – множество всех вершин графа, репрезентирующее всех агентов (далее мы не будем различать агентов и вершины);
- $\theta(a)$  – состояние природы с точки зрения агента  $a$ ,  $a \in A$ ,  $\theta \in \Theta$ ;
- $v(a)$  – множество не совпадающих с  $a$  агентов, которых агент  $a \in A$  считает реальными, что отражается на графе в виде стрелок (направленных связей) от этих агентов к  $a$ ; множество  $v(a) \subset A$

для данного агента  $a \in A_i$  состоит из  $(n - 1)$ -го элемента, которые принадлежат, соответственно, множествам  $A_1 \cup \dots \cup A_{i-1} \cup A_{i+1} \cup \dots \cup A_n$ .

Будем считать, что целевые функции всех экземпляров одного и того же реального агента совпадают, т.е. агент  $a \in A_i$  стремится максимизировать функцию  $f_i(\cdot)$ . В этом случае можно определить информационное равновесие – набор действий агентов  $x_a, a \in A$ , таких, что для всех  $i \in N, a \in A_i$

$$x_a \in \operatorname{Argmax}_{x \in X_i} f_i(\theta(a), x, x_{-a}), \quad (1)$$

где через  $x_{-a}$  обозначен набор действий агентов из множества  $v(a)$ .

В работе [3] в качестве примера была рассмотрена рефлексивная игра со следующей целевой функцией агентов:

$$f_i(\theta, x_1, x_2, x_3) = (\theta - x_1 - x_2 - x_3)x_i - \frac{x_i^2}{2}, \quad (2)$$

где  $x_i \geq 0, i \in N = \{1, 2, 3\}$ ;  $\theta \in \Theta = \{1, 2\}$ . Далее, в зависимости от различной информированности игроков, для нахождения информационного равновесия необходимо из условий первого порядка  $\partial f_i / \partial x_i = 0$  найти наилучшие ответы игроков и решить систему линейных уравнений. Переходя к произвольному числу агентов, можно обобщить целевую функцию (1) агента  $i$  в следующем виде:

$$f_i(\theta, x_a, x_{-a}, G_I) = (\theta(a) - \beta \sum_b g_{ab} x_b) x_a - \frac{x_a^2}{2}, \quad (3)$$

где  $G_I$  – граф рефлексивной игры, в котором  $g_{ab} = 1$  при  $b \in v(a)$ , иначе  $g_{ab} = 0, g_{aa} = 0$ . Параметр  $\beta > 0$  отражает характер зависимости от действий соседей. Система наилучших ответов игроков с функцией (2) принимает следующий вид

$$x_a = \theta(a) - \beta \sum_{b \in \sigma(a)} g_{ab} x_b, \quad (4)$$

в матричном виде

$$x = \theta - \beta G_I x, \quad (5)$$

или

$$(I + \beta G_I) x = \theta. \quad (6)$$

где  $I$  – единичная матрица<sup>4</sup>. В такой постановке игра полностью соответствует довольно популярной среди зарубежных исследователей [4-6]. Разница состоит в том, что в качестве сети взаимодействия  $G$  в рефлексивной игре используется граф  $G_I$  рефлексивной игры. А именно, равновесие Нэша в линейно-квадратичной игре

$$x^* = [I + \beta G]^{-1} \theta, \quad (7)$$

а информационное равновесие в рефлексивной игре

$$x^* = [I + \beta G_I]^{-1} \theta. \quad (8)$$

Похожие модели рассматривались в работах [7-9]: действительно, равновесие для игры [7] с функцией выигрыша  $f_i(r_i, x_i) = (\sum_{j \in N} x_j - 1)x_i - \frac{x_i^2}{2r_i}$  на произвольном графе можно представить как

$$x^* = \left( I \left( 1 - \frac{1}{r} \right) + G \right)^{-1} 1, \quad (9)$$

а равновесие для игры [8] с функцией  $f_i(\theta, r_i, x_i) = (\theta_i - \sum_{j \in N} x_j)x_i - \frac{x_i^2}{2r_i}$  можно представить как

$$x^* = \left( I \left( 1 + \frac{1}{r} \right) + G \right)^{-1} A. \quad (10)$$

## 2. Задача стимулирования для рефлексивной игры Курно

Для линейно-квадратичной игры на сети в [2] изложена задача стимулирования – управления вектором  $\theta$  – для максимизации функции общественного благосостояния:

$$W(\theta, G) = \sum_{i \in N} f_i \rightarrow \max_{\theta} \quad (11)$$

Рассмотрим аналогичную задачу для рефлексивной игры с точечной структурой информированности:

$$W(\theta, G_I) = \sum_{i \in N} f_i \rightarrow \max_{\theta} \quad (12)$$

Будем считать, что в данной ситуации изменение стимулов возможно только для реальных агентов (заметим, что «стимулирование фантомных агентов» является, по сути, информационным управлением), однако управляющий орган (центр) может по-разному информировать реальных агентов, тем самым изменяя структуру информированности и порождая новых фантомных агентов. А именно, рассмотрим случай, когда в начале имело место общее знание между агентами, а далее происходит следующий

<sup>4</sup> Нетрудно проверить, что в таком виде модель из оригинальной статьи [3] можно представить как

$$f_i(\theta, x_a, x_{-a}, G_I) = \left( \theta(a) - \sum_{b \in \sigma(a)} g_{ab} x_b \right) x_a - x_a^2 - \frac{x_a^2}{2},$$

а система наилучших ответов принимает вид  $x_a = \frac{\theta(a) - \sum_{b \in \sigma(a)} g_{ab} x_b}{3}$ , или  $(3I + G_I)x = \theta$ .

многошаговый информационный процесс: на каждом шаге центр индивидуально сообщает об изменении  $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$  поочередно всем  $i$ -м реальным агентам.

Тогда в начальный момент структура информированности множества  $A_1, \dots, A_n$  являются одноэлементными. Далее на каждом шаге в каждое из множеств  $A_i, i \in N$ , добавляется один экземпляр  $\hat{a}_i$ , который становится реальным агентом; при этом  $\theta(\hat{a}_i) = \hat{\theta}_i$ , а множество  $v(\hat{a}_i)$  составляют экземпляры агентов, реальных на предыдущем шаге.

Рассмотрим пример:

$$U_i = (\theta_i - x_1 - x_2 - x_3)x_i - \frac{x_i^2}{2} \quad (13)$$

для случая  $n = 3$  агентов. Наилучшие ответы игроков

$$\begin{cases} BR_1 = \frac{\theta_i - x_2 - x_3}{3}, \\ BR_2 = \frac{\theta_i - x_1 - x_3}{3}, \\ BR_3 = \frac{\theta_i - x_1 - x_2}{3}. \end{cases} \quad (14)$$

Исследуем значения  $W(U, \theta) = \sum_{i \in \{1,2,3\}} U_i$  в зависимости от числа шагов сообщений центра. При  $\theta_i = 1$  равновесные ответы игроков  $x_i^* = 0.2$ , а значение функции общественного благосостояния  $W(\theta) = 0.6$ . Пусть центр меняет исходные значения  $\theta_i = 1$  на новые  $\hat{\theta}_i = 2$ . В случае общего знания об изменении  $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$  равновесные ответы игроков  $x_i^* = 0.4$ , а значение функции общественного благосостояния  $W(\theta) = 1.2$ . Однако в ситуации многошагового индивидуального информирования агентов об изменении  $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$  равновесные ответы игроков и значение функции общественного благосостояния меняются, в пределе достигая значения для случая общего знания.

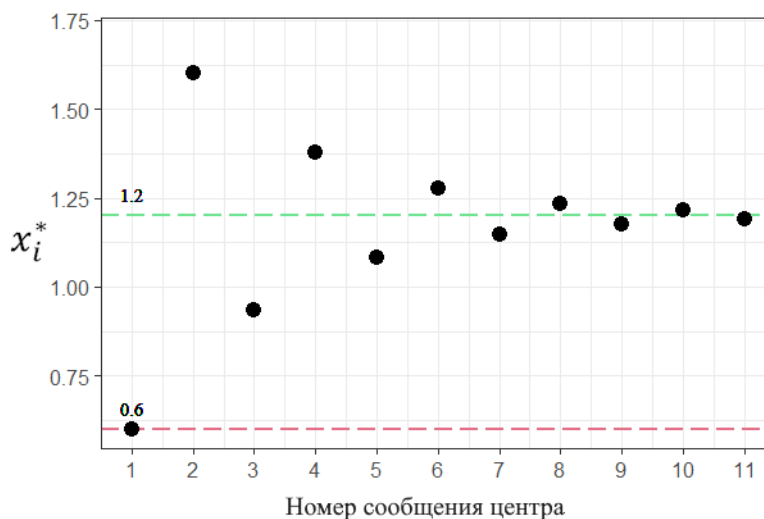


Рис. 1. Равновесные ответы игроков в зависимости от числа сообщений центра в игре с эффектом стратегической заменимости ( $\beta < 0$ ). Точками отмечены ответ игрока  $x_i^*$  в зависимости от сообщения центра. Красной линией отмечены равновесные ответы игроков в игре с общим знанием при  $\theta_i = 1$ , зеленой при  $\hat{\theta}_i = 2$ .

## 5. Заключение

В работе рассмотрена модель коллективного поведения агентов, обладающих игровой неопределенностью относительно информированности оппонентов, или информационной рефлексией. На примере рефлексивной игры Курно показано, что в отдельных случаях, а именно – в случаях, когда наилучшие ответы игроков линейно зависят от других, связанных с ними агентов, информационное равновесие может быть описано в явном виде в терминах структуры информированности агентов.

## Литература

1. Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Рефлексия и управление: математические модели. – М.: Издательство физикоматематической литературы, 2013. – 412 с.
2. Novikov D. A., Chkhartishvili A. G. Reflexion and Control: Mathematical Models. – Leiden: CRC Press, 2014. – 298 p.
3. Galeotti A., Golub B., Goyal S. Targeting interventions in networks. *Econometrica*. 2020. Т. 88. №. 6. С. 2445-2471.
4. Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Информационное равновесие: точечные структуры информированности // Автоматика и телемеханика. 2003. №. 10. С. 111-122.
5. Bramoull'e Y., Kranton R., D'amours M. Strategic interaction and networks // *American Economic Review*. 2014. Т. 104, № 3. С. 898—930.
6. Bramoull'e Y., Kranton R. Public goods in networks // *Journal of Economic theory*. 2007. Т. 135, № 1. С. 478—494.
7. Bramoull'e Y., Kranton R. Games Played on Networks // *Oxford Handbook on the Economics of Networks*. 2016.
8. Fedyanin D. N., Chkhartishvili A. G. On a model of informational control in social networks // *Automation and Remote Control*. 2011. Vol. 72, No. 10. С. 2181–2187.
9. Fedyanin D., Dranov E.. Random beliefs in Cournot competition / *Proceedings of the 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Липецк: IEEE, 2023. С. 464-469 <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10349382>.
10. Fedyanin D. The complex mechanism of belief control for cost reduction under stability restriction. Cournot competition example. // *IFAC-PapersOnline*. 2019. Volume 52 Issue 25. С. 269-274.

# Дополнительные материалы

## САМАРСКАЯ ШКОЛА ТАС

**Гераськин М.И.**

*Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия*

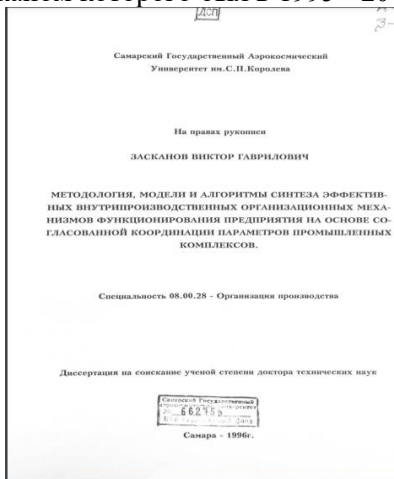
Основатель Самарской школы ТАС Виктор Гаврилович Засканов (11.05.1942 г. – 13.05.2020 г.)



В 1965 году окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ). В 1973 год защитил кандидатскую диссертацию и поступил на работу в Куйбышевский авиационный институт на кафедру автоматизированных систем управления (АСУ). С 1985 года по 1991 года Засканов работал заведующим кафедрой экономики промышленности Куйбышевского политехнического института. В 1991 года Виктор Гаврилович вернулся на работу в КуАИ на должность директора Бизнес-центра. В 1995 году на базе



колледжа экономики и управления Виктор Гаврилович создал факультет экономики и управления, деканом которого был в 1995 - 2007 гг.



После защиты в 1996 году докторской диссертации Засканову В.Г. присуждена учёная степень доктора технических наук, в 1997 году присвоено учёное звание профессора.

В 2001 году был открыт совет по защите кандидатских диссертаций экономического профиля. Этому способствовали прочные связи, установленные ВГ. Заскановым с Институтом проблем управления РАН.



Первая школа-конференция УБС состоялась летом 2006 г. по инициативе д.т.н., профессора Новикова Дмитрия Александровича. Организацией и проведением первой школы-конференции руководил Виктор Гаврилович Засканов, который замыкал на себя буквально все процессы – начиная от размещения участников и вплоть до организации загородной поездки на теплоходе по Волге. Ученики Виктора Гавриловича, в первую очередь Иванов Дмитрий Юрьевич (ныне директор Института экономики и управления), составляли оргкомитет, которому довелось стать первопроходцами в этом новом деле. Программный комитет и работу секций, возглавлял, как и сейчас, Дмитрий Александрович, проявлявший

внимание к каждому докладчику и высказывавший свои комментарии с неповторимой чуткостью и тактом.

Заседания конференции проходили в учебных аудиториях Самарского аэрокосмического университета, но заключительный день конференции был посвящен неформальному общению на просторах великой русской реки.



В числе участников были тогда еще восходящие звезды современной теории управления, а ныне маститые ученые ИПУ РАН и Самарского университета: Николай Андреевич Коргин, Глушенко Антон Игоревич, Исакаев Михаил Борисович, Богатырев Владимир Дмитриевич (сейчас ректор университета). Уже на начальных этапах восхождения к научному олимпу они удивляли нас многообразием идей и оригинальностью заключений.

По итогам конференции был издан сборник научных трудов «Управление большими системами», число статей в котором (16) свидетельствует об относительно небольшом количестве участников конференции. В самом деле, это было начало широкого движения молодых ученых в сфере теории управления!

**Сооснователь Самарской школы ТАС Геннадий Михайлович Гришанов** окончил в 1964 году Куйбышевский индустриальный институт (сегодня Самарский государственный технический университет). Затем начал работу в г. Новокуйбышевск, в Централизованном конструкторском бюро по автоматизации нефтепереработки и нефтехимических процессов, где началась их совместная творческая деятельность с Виктором Гавриловичем Заскановым. В 1993 году Геннадий Михайлович Гришанов защитил докторскую диссертацию по проблемам управления технологическими процессами.

Продолжатели научного направления Виктора Гавриловича Засканова


Под научным руководством Засканова В.Г. защитились 20 кандидатов и докторов экономических и технических наук, поэтому его дело живо, развивается и продолжает наращивать творческий потенциал.



*Научное направление «Координация межорганизационных и межкорпоративных взаимодействий»*

**Богатырев В.Д.**, д.э.н., профессор, ректор Самарского университета, заведующий кафедрой экономики, защитил под руководством В.Г. Засканова кандидатскую и докторскую диссертации.

Дис  
Б 732

  
**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**


**БОГАТЫРЕВ ВЛАДИМИР ДМИТРИЕВИЧ**

Моделирование процедур анализа и согласованного  
управления инвестиционными проектами

Специальность 08.00.13. Экономико-математические методы

Диссертация  
на соискание степени  
кандидата экономических наук  
667123  
Самара 1997-2000

Дис  
Б 732

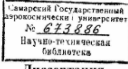
  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ** имени академика С. П. Королева

На правах рукописи

**БОГАТЫРЕВ ВЛАДИМИР ДМИТРИЕВИЧ**

**Модели и экономические механизмы  
согласованного взаимодействия  
в промышленных комплексах**

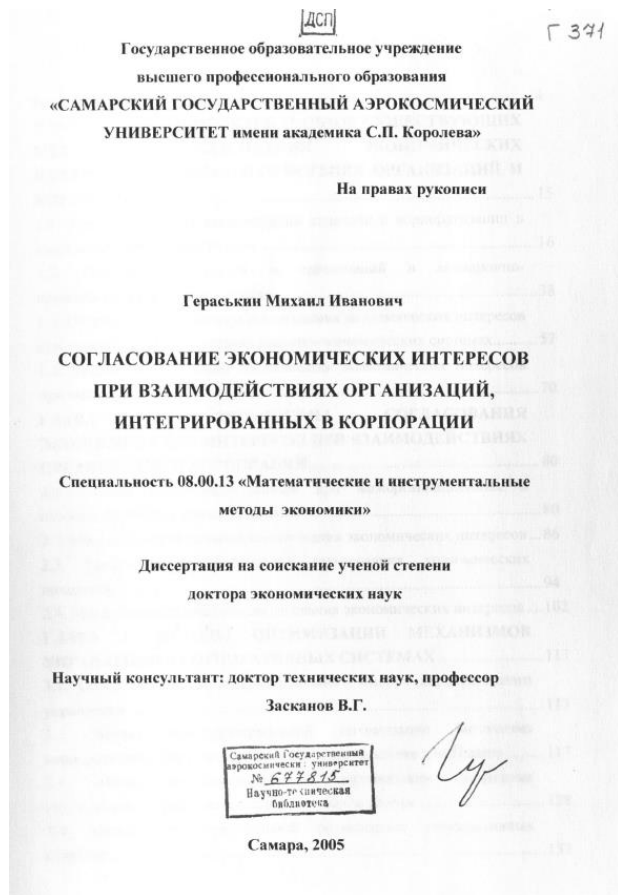
Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные  
методы экономики

  
Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора экономических наук

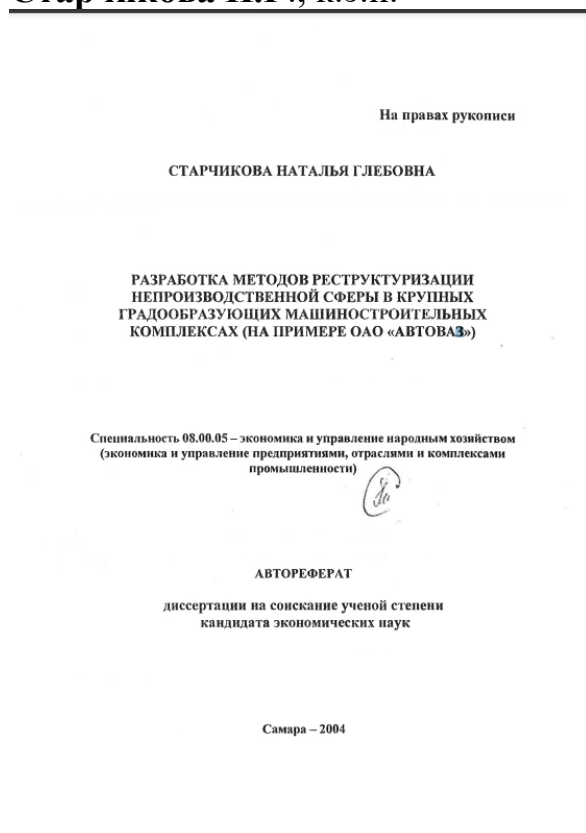
Самара 2005



**Гераськин М.И.**, д.э.н., профессор, заведующий кафедрой математических методов в экономике Самарского университета.



## Старчикова Н.Г., к.э.н.



## Поляков А.П., к.т.н.,

61: 02-5/1528-1

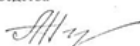
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. Королёва

На правах рукописи

ПОЛЯКОВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

ОРГАНИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ВЕРТИКАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ  
АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
( модели, алгоритмы, реализация)

Специальность: 05.02.22 - Организация производства



ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

САМАРА - 2001

[dsLib.net](http://dsLib.net)  
библиотека диссертаций

**Коровкин Г.Л., к.т.н.**



Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. С. П. Королёва

На правах рукописи

Коровкин Григорий Львович

"Разработка моделей и методов организации процессов  
проектирования и создания авиационных комплексов (на основе  
предприятий авиационной промышленности Самарской  
области)"

Специальность 05.02.22 - организация производства  
(машиностроение)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Самара, 2003

**Сяо Янь Чжун, к.э.н.**

ДСП
Дис  
С 998

Самарский государственный аэрокосмический университет  
 имени академика С.П. Королева

На правах рукописи

**Сяо Янь Чжун**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СОГЛАСОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНТЕРЕСОВ В РОССИЙСКО-КИТАЙСКИХ ВНЕШНЕТОРГОВЫХ ОТНОШЕНИЯХ**

Специальность 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Засканов В.Г.**

Самарский Государственный аэрокосмический университет  
 И.И. Ограниченный фонд

Самара, 2002

**Гришанов Д.Г., к.э.н.**

ДСФ

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева

На правах рукописи

ГРИШАНОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

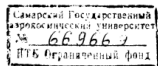
МОДЕЛИ И МЕХАНИЗМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КООРДИНАЦИИ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ПОСТАВЩИК - ЗАКАЗЧИК»

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные  
методы экономики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата экономических наук

Научный руководитель д.т.н., профессор Засканов В.Г.



Самара – 2003

*Научное направление «Координация внутриорганизационных взаимодействий»*

**Иванов Д.Ю.**, д.э.н., профессор кафедры организации производства, директор института экономики и управления Самарского университета.

ДСФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П.Королева  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Иванов Дмитрий Юрьевич

МЕТОДОЛОГИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ  
ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНО-СОГЛАСОВАННЫХ СИСТЕМ  
МАТЕРИАЛЬНОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Специальность

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

ДИССЕРТАЦИЯ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА ЭКОНОМИЧЕСКИХ НАУК

Научный консультант  
д.т.н., профессор Засканов В.Г.



Самара, 2011



**Голубева Т.В.**, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и организации производства Самарского университета.

На правах рукописи

ГОЛУБЕВА ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
АППАРАТА ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
(на примере краностроительного предприятия ОАО «Сокол»)

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные методы  
экономики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара - 2004



**Савельева Е.А.**, к.э.н.,

На правах рукописи

САВЕЛЬЕВА ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ  
СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАТРАТАМИ  
(на примере ЗАО «Самарский Стройфарфор»)

Специальность 08.00.05. – экономика и управление народным хозяйством  
(экономика, организация и управление предприятиями, отраслями и  
промышленными комплексами)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
экономических наук

Самара, 2002



**Савин А.Г.**, к.э.н., с 2010 по 2013 год – Глава администрации Железнодорожного района городского округа



На правах рукописи

САВИН АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

Разработка моделей и методов ценообразования при организации  
арендных отношений в торгово-развлекательных центрах  
(на примере Самарского ТРЦ «Мегакомплекс Московский»)

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные методы  
экономики



АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук

Самара – 2006



Бейгель М.Р., к.э.н.



Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королева

На правах рукописи

БЕЙГЕЛЬ МИХАИЛ РОМАНОВИЧ

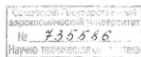
**Разработка экономико - математических моделей организации арендных  
отношений в механизмах функционирования современных торговых  
центров (на примере ТТЦ «Аквариум», г.Самара)**

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные методы  
экономики.

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата экономических наук

Научный руководитель д.т.н., профессор Засканов В.Г.



Самара, 2009

**Окунева А.Г., к.э.н., доцент кафедры экономики Самарского университета**

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. С. П. КОРОЛЕВА

На правах рукописи

ОКУНЕВА АЛЛА ГЕННАДЬЕВНА

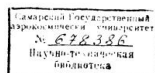
**КРИТЕРИИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ  
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ АВИААГРЕГАТНОГО  
ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ДИВЕРСИФИКАЦИИ  
(на примере ОАО «АВИААГРЕГАТ»)**

Специальность 08.00.05 – Экономика и управление народным  
хозяйством (экономика, организация и управление предприятиями,  
отраслями и комплексами промышленности)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор В. Г. Засканов



Самара – 2006

**Стопневич Н.А., к.э.н.**

  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА

На правах рукописи



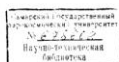
Стопневич Николай Александрович

**Методы оценки стратегий поведения работников промышленных  
предприятий**

Специальность 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством

Научный руководитель:  
Доктор технических наук, профессор Засканов В.Г.


Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук



Самара 2006

*Научное направление «Координация внутриорганизационных и межорганизационных  
финансовых взаимодействий»*

**Пыркoв М.М., к.э.н.**

  
Министерство образования Российской Федерации  
Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева

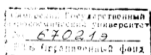
Пыркoв Михаил Михайлович

Разработка моделей формирования  
депозитного и кредитного портфелей  
коммерческого банка с учетом прогноза  
конъюнктуры финансового рынка

Специальность 08.00.13 – математические и  
инструментальные методы экономики

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор В.Г. Засканов



Самара 2004

**Озернов Р.С., к.э.н.**

На правах рукописи

**Озернов Роман Сергеевич**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГРАФИКОВ ЛИЗИНГОВЫХ ПЛАТЕЖЕЙ В  
АВИАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ЗАО «АВИАКОМПАНИЯ «ВОЛГА-ДНЕПР»)**

Специальность 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации

на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара – 2007

**Чекменев Д.И., к.э.н.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)»

**ЧЕКМЕНЕВ ДМИТРИЙ ИГОРЬЕВИЧ**

Разработка методов и комплекса взаимосвязанных моделей принятия решений  
по инвестированию и финансированию фирм и организаций  
(на примере ОАО «ИК Перспектива Плюс»)

08.00.10 – Финансы, денежное обращение и кредит

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук.

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Засканов В.Г.

Самара - 2012

**Продолжатели научного направления Геннадия Михайловича Гришанова**

Под научным руководством Гришанова Г.М. защитились **20** кандидатов и докторов  
экономических и технических наук (**Нужно указать отдельно число докторов и кандидатов**).

*Научное направление «Координация внутриорганизационных взаимодействий»*

Засканова Елена Викторовна к.э.н.

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА

*На правах рукописи*

**ЗАСКАНОВА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА**  
**РАЗРАБОТКА БАЗОВЫХ МОДЕЛЕЙ ВНУТРИПРОИЗВОДСТВЕННЫХ**  
**МЕХАНИЗМОВ МАТЕРИАЛЬНОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ**  
**МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**  
(на примере авиастроительного предприятия ЗАО «АВИАСТАР-СП»)

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные методы экономики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
экономических наук

*Е.Засканова*

САМАРА 2002

Скиба Марина Валерьевна к.э.н., доцент кафедры менеджмента и организации производства,  
директор Департамента образовательных программ и управления учебным процессом

*На правах рукописи*  


СКИБА МАРИНА ВАЛЕРЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННЫХ МЕХАНИЗМОВ**  
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАК ИНСТРУМЕНТА**  
**ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**  
**И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГОУСТАНОВОК**  
(НА ПРИМЕРЕ ОАО «СНТК им. И.Д. КУЗНЕЦОВА»)

Специальность: 08.00.05 – Экономика и управление  
народным хозяйством

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук



Митник Александр Викторович

к.э.н.

На правах рукописи



Митник Александр Викторович

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВЕННО-СЫТОВОЙ СИСТЕМОЙ  
НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ КОМПАНИИ**

Специальность: 08.00.05 - экономика и управление народным хозяйством (15 Экономика, организация и управление предприятиями, отраслями и комплексами промышленности).

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара – 2007

Сургутанов Андрей Витальевич К.Э.Н.

На правах рукописи



Сургутанов Андрей Витальевич

**МОДЕЛИ КОНКУРЕНТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА РЫНКЕ СБЫТА  
ПРОДУКЦИИ С СЕЗОННЫМ ХАРАКТЕРОМ СПРОСА  
(на примере предприятий по выпуску и сбыту учебной литературы)**

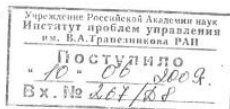
**Специальность**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара – 2009

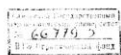


Гречников А.Ф. к.э.н.

Гречников Александр Фёдорович

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ В ОПЕРАТИВНОМ СОГЛАСОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ  
ПРОКАТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные  
методы экономики



Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель д.т.н., профессор Гришанов Г.М.

Самара 2001

Романеева Е.В.

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА

На правах рукописи

Романеева Елена Владимировна

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОГЛАСОВАННЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ  
КАЧЕСТВОМ УСЛУГ В СФЕРЕ СЕРВИСА

Специальность 08.00.13 – «Математические и инструментальные  
методы экономики»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор Гришанов Геннадий Михайлович



Самара – 2002 г.

Коломиец П.Э. к.э.н.

Министерство образования Российской Федерации  
Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева

На правах рукописи

Коломиец Павел Эдуардович

**Моделирование и оптимизация затрат  
в системе управления качеством продукции  
(на примере ОАО «Волгабурмаш»)**

08.00.13 – «Математические и инструментальные  
методы экономики»

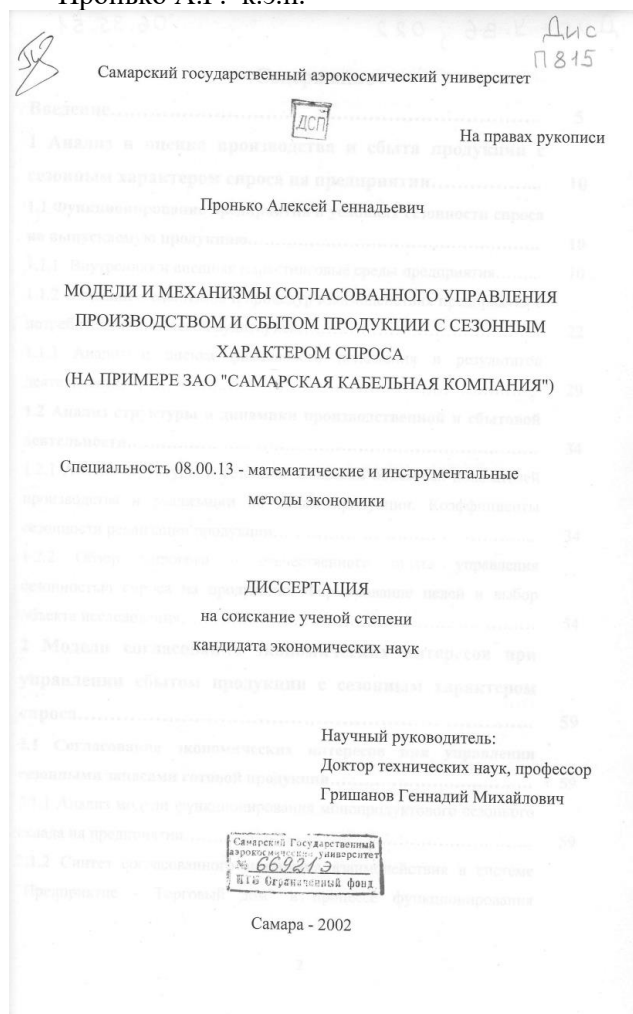
Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель,  
д.т.н., профессор  
Гришанов Г.М.



Самара - 2002

Пронько А.Г. к.э.н.



Фомичев В.П., к.э.н., председатель комиссии по экономике, промышленности, сельскому хозяйству и предпринимательству Общественной палаты Самарской области



Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва

На правах рукописи

ФОМИЧЕВ ВАЛЕРИЙ ПЕТРОВИЧ

СОГЛАСОВАННЫЕ МЕХАНИЗМЫ АРБИТРАЖНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Специальность 08.00.05 - экономика управления народным хозяйством

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени кандидата экономических наук

Научный руководитель д.т.н., профессор Гришанов Г.М.

669393  
Самара - 2002



Горбунова О.А. к.э.н.

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА

На правах рукописи

Горбунова Оксана Александровна

СОГЛАСОВАННЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ  
МОТИВАЦИОННОГО ВНУТРИФИРМЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ КОЛЛЕКТИВА  
(НА ПРИМЕРЕ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА)

Специальность 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством  
(экономика, организация и управление предприятиями, отраслями и  
комплексами промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самарский Государственный  
Аэрокосмический Университет  
№ 669393  
Ильинский филиал

Научный руководитель д.т.н., профессор Гришанов Г.М.

Самара – 2003

*Научное направление «Координация внутриорганизационных и межорганизационных  
финансовых взаимодействий»*

Агеев Илья Викторович, к.э.н

На правах рукописи

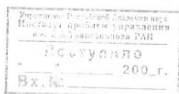


АГЕЕВ Илья Викторович

**МЕХАНИЗМЫ И ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
КРЕДИТНОГО ПОРТФЕЛЯ С УЧЕТОМ РИСКОВ**

Специальность  
08.00.10 - Финансы, денежное обращение и кредит

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук



Самара - 2009

Галай Олег Петрович, к.э.н

На правах рукописи



ГАЛАЙ Олег Петрович

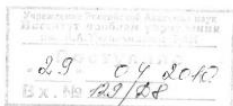
**ФОРМИРОВАНИЕ ДЕПОЗИТНО-КРЕДИТНЫХ СТРАТЕГИЙ  
С УЧЕТОМ КОНЬЮНКТУРЫ ДЕНЕЖНОГО РЫНКА  
И ЛИКВИДНОСТИ КОММЕРЧЕСКОГО БАНКА**

Специальность 08.00.10 – Финансы, денежное обращение и кредит

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара - 2010



Суслин В.С., к.э.н.



САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ

На правах рукописи

Суслин Валерий Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
НАЛОГООБЛОЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 08.00.13 – математические и инструментальные методы  
экономики

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор  
Гришанов Г.М.



Самара 2003

Родомакина М.И. к.э.н.

На правах рукописи

Родомакина Мария Игоревна

**СОГЛАСОВАННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ БЮДЖЕТА  
ПРОДАЖ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

Специальность 08.00.05 – «Экономика и управление народным  
хозяйством (экономика, организация и управление предпри-  
ятиями, отраслями, комплексами промышленности)»

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара – 2007

Щелоков Д.А. к.э.н.

---

На правах рукописи

Щелоков Дмитрий Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА БЮДЖЕТНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ПОСТАВКАМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕСУРСОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**Специальность**

08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством  
(15. Экономика, организация и управление предприятиями,  
отраслями, комплексами промышленности)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Самара – 2007

1

**Продолжатели научных направлений учеников В.Г. Засканова и Г.М. Гришанова**

Ученики Богатырева В.Д.

Ученики Иванова Д.Ю.

Ученики Гераськина М.И.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ РИТЕЙЛЕРА И ПОСТАВЩИКА ПРИ СТЕПЕННЫХ ФУНКЦИЯХ СПРОСА И ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЯХ ИЗДЕРЖЕК

Горохов Д.Ю.

Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия  
goroh63@mail.ru

*Аннотация.* Рассматривается проблема взаимодействий поставщика и ритейлера в цепи поставок товаров. Сформулирована математическая модель оптимизации стратегий агентов цепи поставок для случая степенной функции спроса покупателей и линейных функций издержек агентов. Определены механизмы оптимизации стратегий агентов.

*Ключевые слова:* ритейлер, поставщик, цепь поставок, целевая функция, оптимизация.

## Введение

В современных исследованиях экономики розничных торговых сетей большое внимание уделяется проблеме координации в цепях поставок [1-12]. Цепь поставок представляет собой устойчивое взаимодействие поставщика товара (производителя) и ритейлера (розничного продавца), которые являются агентами торгово-производственной системы. Взаимодействие агентов выражается в процессе систематической передачи товара от поставщика к ритейлеру и оплате этого товара на определенных условиях, формализованных в контракте поставки. Стороны контракта имеют различные целевые функции, базируясь на которых осуществляется согласование параметров контракта (цены и объемов поставки). Это приводит к проблеме оптимизации взаимодействий поставщика и ритейлера, которая вытекает из различия между объемом поставки, оптимальным исходя из интересов ритейлера, и объемом поставки, оптимизирующим целевую функцию поставщика. Выбор компромиссного значения объема поставки может быть сделан из так называемой области компромисса, ограниченной указанными оптимумами агентов.

Цена товара, как правило, не является параметром согласования, поскольку определяется рыночным спросом на товар. В большинстве исследований [1-12] цена товара считается фиксированной, т.е. не рассматривается функция рыночного спроса; эта модель близка к рынку совершенной конкуренции. Однако такой подход чрезмерно упрощает реальную рыночную ситуацию в игровой проблеме «поставщик-ритейлер», поэтому в данной статье рассмотрена проблема координации в цепях поставок в случае убывающей функции спроса, заданной в форме степенной функции. Убывающая кривая спроса адекватна в случае рынка монополистической конкуренции, который характерен для большинства товаров, реализуемых в розничной сети населению. Различные подходы к моделированию спроса при взаимодействиях агентов на основе нелинейных функций рассматривались в [13-15]. В данной статье исследуется проблема координации взаимодействий на основе комбинации контрактов распределения выручки и трансфертной цены.

## 1. Математическая формулировка задачи

Взаимодействие поставщика и ритейлера в цепи поставок товара, количество которого равно  $q$ , исследуем с позиций оптимизации интересов агентов. Рассмотрим целевые функции поставщика и ритейлера:

$$\max \pi_s = R_s(q) - C_s(q), \quad (1)$$

$$\max \pi_r = R_r(q) - C_r(q), \quad (2)$$

В этих формулах использованы следующие обозначения: символ «s» характеризует параметры поставщика, символ «r» характеризует параметры ритейлера;  $\pi$  – прибыль;  $R$  – выручка;  $C$  – издержки.

Будем считать, что спрос покупателей описывается степенной функцией вида:

$$p(q) = Aq^B, \quad (3)$$

где  $A$  – постоянная,  $A > 0$ ;  $B$  – коэффициент эластичности цены по объему продаж,  $B < 0, B < 1$ .

Модель спроса на товар поставщика является взаимосвязанной с конечным спросом покупателей, т.е. выражает так называемый производный спрос и определяется в аналогичной форме:

$$w(q) = aq^b, \quad (3a)$$

где  $w$  – закупочная (внутренняя, трансфертная) цена;  $a$  – постоянная,  $a > 0$ ;  $b$  – коэффициент эластичности цены по объему продаж,  $b < 0, b < 1$ .

Поскольку производный спрос является зависимым от конечного спроса покупателей, то функции

$p(q)$  и  $w(q)$  имеют одинаковую эластичность, т.е.

$$B = b. \quad (36)$$

Введем следующие функции издержек:

$$C_s(q) = c_s q + C_{Fs}, \quad C_r(q) = (c_r + w)q + C_{Fr}, \quad (4)$$

где  $c$  – предельные издержки;  $C_F$  – постоянные издержки.

Рассмотрим механизм взаимодействий поставщика и ритейлера на основе контракта распределения выручки, при котором функции выручки агентов имеют вид:

$$R_s(q) = \phi p(q)q + wq, \quad R_r(q) = (1 - \phi)p(q)q, \quad (5)$$

где  $\phi$  – коэффициент распределения выручки,  $\phi \in [0, 1]$ .

С учетом (3)-(5) целевые функции поставщика и ритейлера имеют вид:

$$\pi = \phi A q^{B+1} + a q^{B+1} - c q - C, \quad (6)$$

$$\pi_r = (1 - \phi) A q^{B+1} - c q - a q^{B+1} - C_{Fr}. \quad (7)$$

Сформулируем задачу определения объемов поставки, оптимизирующих целевые функции поставщика (6) и ритейлера (7).

## 2. Оптимальные механизмы агентов

Необходимые условия максимума целевых функций поставщика (6) и ритейлера (7) имеют вид:

$$\pi' = \phi A (B + 1) q^B + a (B + 1) q^B - c = 0, \quad (8)$$

$$\pi_r' = (1 - \phi) (B + 1) A q^B - a (B + 1) q^B - c = 0. \quad (9)$$

Из необходимых условий максимума следуют оптимальные механизмы агентов:

$$q_s^* = \left( \frac{c_s}{\phi A (B + 1) + a (B + 1)} \right)^{\frac{1}{B}}, \quad (10)$$

$$q_r^* = \left( \frac{c_r}{(1 - \phi) A (B + 1) - a (B + 1)} \right)^{\frac{1}{B}}. \quad (11)$$

Достаточные условия максимума целевых функций поставщика (6) и ритейлера (7) с учетом (8), (9) имеют вид:

$$\pi'' = \phi A (B + 1) B q^{B-1} + a (B + 1) B q^{B-1} < 0, \quad (12)$$

$$\pi_r'' = (1 - \phi) (B + 1) B A q^{B-1} - a (B + 1) B q^{B-1} < 0. \quad (13)$$

Достаточные условия максимума целевых функций выполняются при заданных параметрах функции спроса (3), т.е.  $A > 0$ ,  $B < 0$ ,  $|B| < 1$ . Достаточное условие максимума прибыли ритейлера кроме того требует соблюдения неравенства

$$(1-\phi)A - a > 0. \quad (14)$$

Для согласования интересов поставщика и ритейлера можно использовать два метода.

В первом методе согласования интересов используем распределение выручки с коэффициентом  $\phi$ , подобранным на основе равенства оптимальных объемов продаж агентов:

$$q_s^* = q_r^*,$$

и  
ли

$$\frac{c_s}{\phi A(B+1) + a(B+1)} = \frac{c_r}{(1-\phi)A(B+1) - a(B+1)}.$$

Из этого уравнения получим:

$$\phi_{coord} = \frac{Ac_s - a(c_r + c_s)}{A(c_s + c_r)}, \quad (15)$$

где  $\phi_{coord}$  – координирующее значение коэффициента распределения выручки.

Второй метод согласования интересов поставщика и ритейлера базируется на равенстве максимальной прибыли, т.е.

$$\pi_s^* = \pi_r^*.$$

В этом случае координирующее значение коэффициента распределения выручки вычисляется из решения следующего уравнения:

$$(\phi A + a)q_s^{*B+1} - c_s q_s^* - C_s = ((1-\phi)A - a)q_r^{*B+1} - c_r q_r^* - C_r,$$

или после подстановки (10),  
(11)

$$\begin{aligned} & (\phi A + a) \left( \frac{c_s}{\phi A(B+1) + a(B+1)} \right)^{B+1} - c_s \left( \frac{c_s}{\phi A(B+1) + a(B+1)} \right)^B - C_s = \\ & = \left( \frac{(1-\phi)A - a}{a} \right)^{B+1} c_r - c_r \left( \frac{c_r}{(1-\phi)A(B+1) - a(B+1)} \right)^B - C_r. \end{aligned} \quad (16)$$

Для координирующего коэффициента, вычисленного по (15) или из уравнения (16), необходимо проверять условие (15).

### 3. Моделирование оптимальных механизмов

Проанализируем характер целевых функций поставщика (6) и ритейлера (7), а также свойства оптимальных механизмов агентов (10), (11) на примере реальных данных розничной торговой сети

«Магнит». На основе обработки статистики динамики цен, объемов продаж и издержек этой компании, а также поставщиков исследованы две товарные группы: 1 – «Пряники»; 2 – «Кетчупы». В результате сформированы следующие модели функций спроса и издержек ритейлера:

$$p_1(q) = 11076q_1^{-0,457}, \quad p_2(q) = 4009q_2^{-0,429}, \quad w_1(q) = 5731q_1^{-0,447}, \quad w_2(q) = 684q_2^{-0,40}$$

$$C_{r1}(q_1) = 27,7q_1 + 45767, C_{r2}(q_2) = 25,7q_2 + 72559.$$

Функции издержек поставщиков (ОАО «Самарский хлебозавод №5», АО "Эссен продакшн АГ") имеют вид:

$$C_{s1}(q_1) = 72,5q_1 + 34838, C_{s2}(q_2) = 47,5q_2 + 76342.$$

На основе этих данных построены графики (рис. 1,2) целевых функций поставщика и ритейлера без учета распределения выручки, т.е. аналогично (6), (7) при  $\phi=0$ :

$$\pi = aq^{B+1} - cq - C \quad \pi = Aq^{B+1} - cq - aq^{B+1} - C.$$

В этом случае  $\phi=0$ , поэтому оптимальные объемы поставки для агентов определяются по формулам, вытекающим из (10), (11):

$$q_{s(\phi=0)}^* = \left( \frac{c_s}{a(B+1)} \right)^{\frac{1}{B}}, \quad q_{r(\phi=0)}^* = \left( \frac{c_r}{A(B+1)-a(B+1)} \right)^{\frac{1}{B}}$$

Оптимальный объем поставки с позиций поставщика товарной группы 1 составляет 3738 кг, а оптимальный объем продаж с позиций ритейлера равен 26346 кг; максимальные значения прибыли поставщика и ритейлера при этих значениях представлены на рис. 1. Очевидно, что имеет место существенное несогласование интересов поставщика и ритейлера.

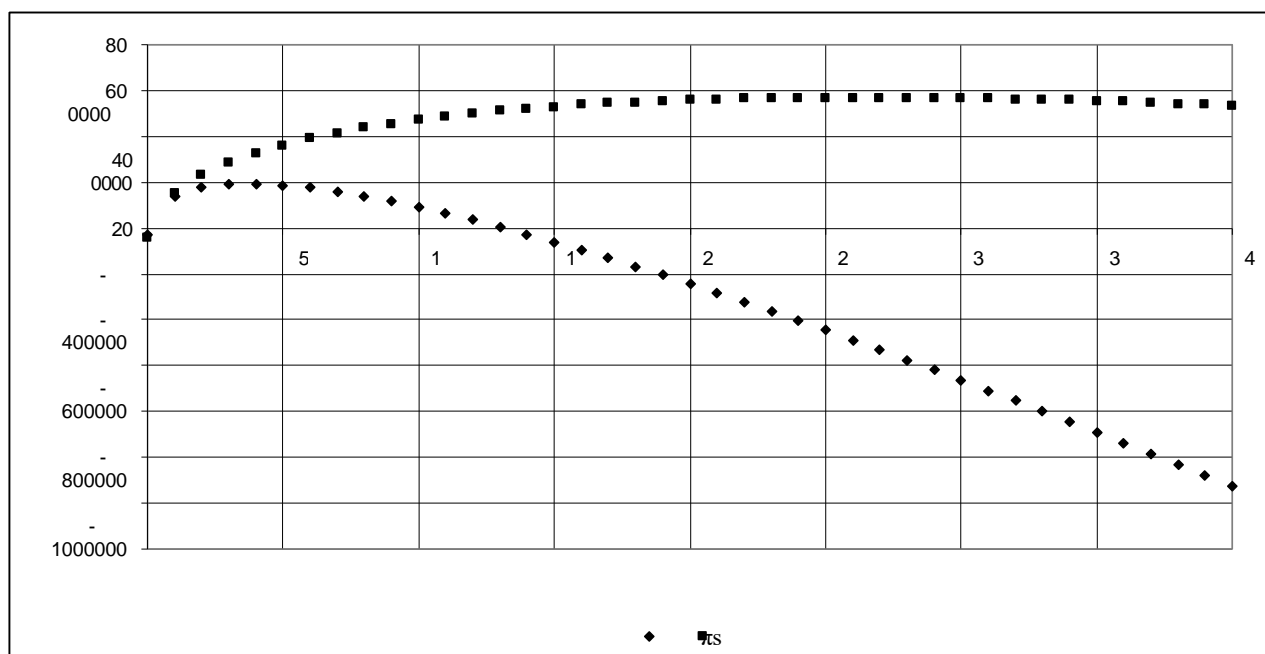


Рис. 1. Функции прибыли поставщика и ритейлера без учета распределения выручки по товарной группе 1

Исследуем механизмы согласования интересов агентов системы (15), (16), обеспечивающие интеграцию поставщика и ритейлера.

Во-первых, рассмотрим согласование интересов поставщика и ритейлера по методу одинаковых оптимальных объемов поставки. В этом случае координирующее значение коэффициента распределения выручки по формуле (15) равно  $\phi_{coord} = 0,206$ , и анализ состояния показан на рис. 2.

В этом случае согласованные объемы поставок составили 7785 кг, однако максимальные значения прибыли агентов существенно различаются (прибыль поставщика 440207 руб., прибыль ритейлера 135733 руб.).

Во-вторых, исследуем согласование интересов поставщика и ритейлера по методу равных значений максимальной прибыли. В этом случае координирующее значение коэффициента распределения выручки из уравнения (16) равно  $\phi_{coord} = 0,107$ , и анализ состояния показан на рис. 3.

В результате такого подхода максимумы прибыли агентов одинаковы и равны 309224 руб., но оптимальные объемы поставки различны: с позиций поставщика оптимальный объем равен 5639 кг, с позиций ритейлера 15227 кг.

Анализ характера изменения целевых функций поставщика и ритейлера по второй товарной группе показал аналогичные результаты.



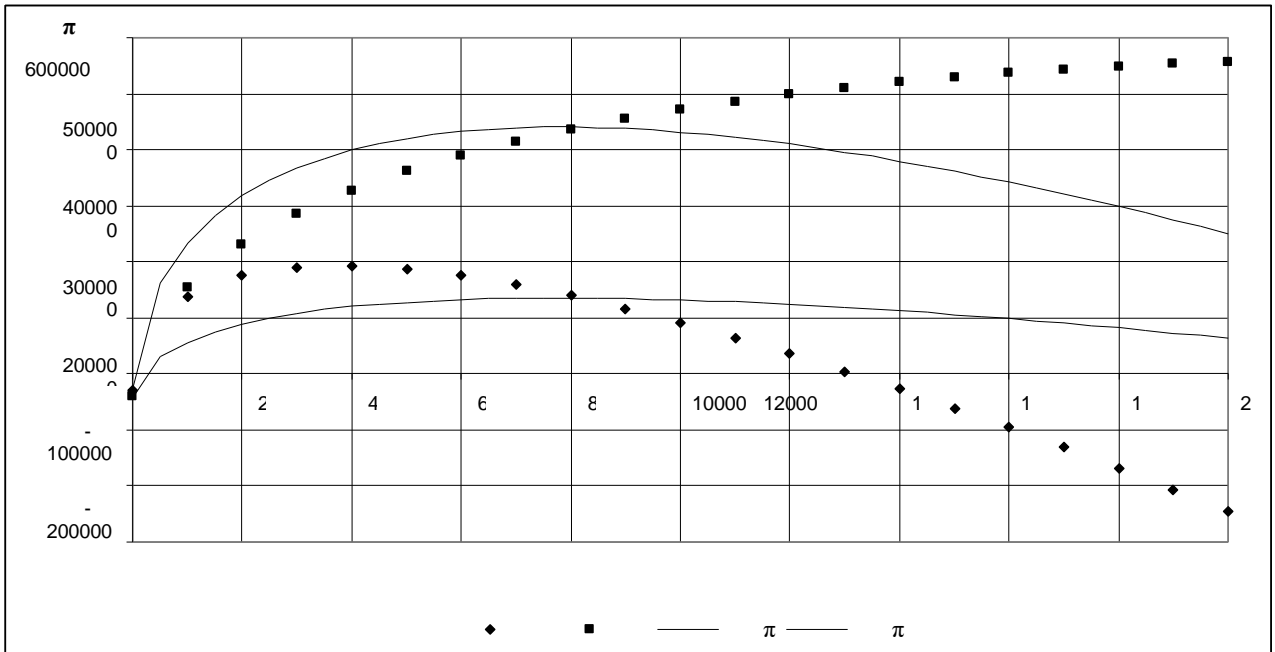


Рис. 2. Функции прибыли поставщика и ритейлера при согласовании по равенству оптимальных объемов по товарной группе 1

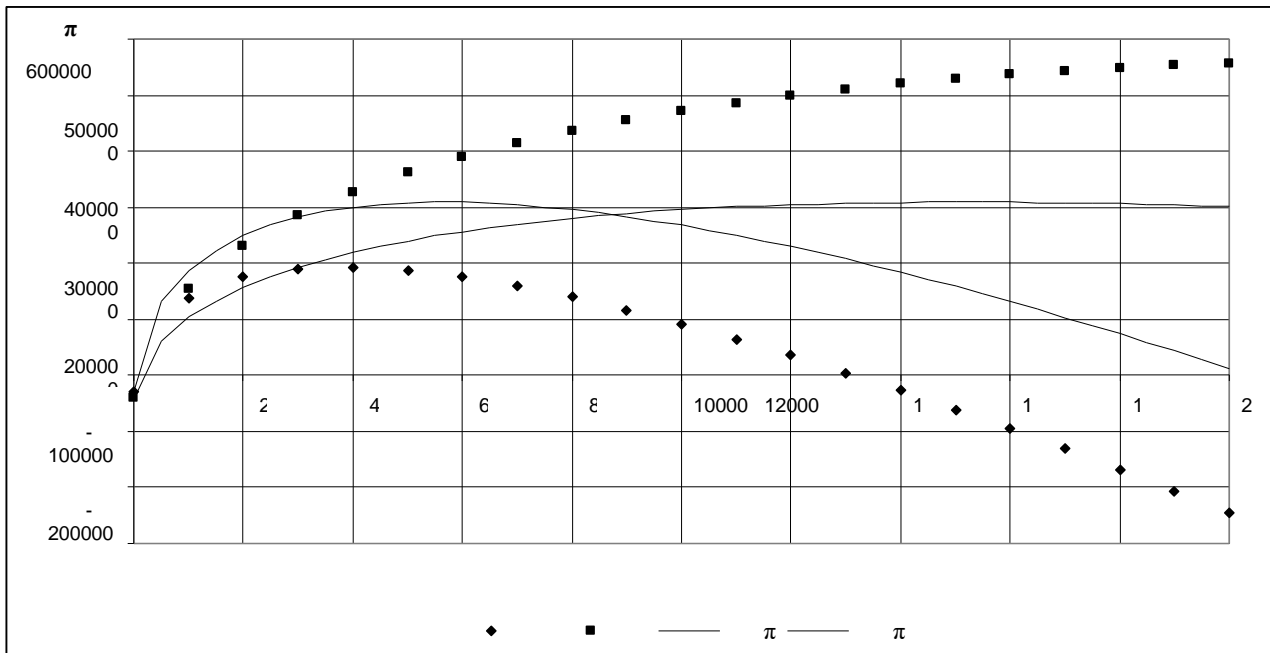


Рис. 3. Функции прибыли поставщика и ритейлера при согласовании по равенству максимумов прибыли по товарной группе 1

#### 4. Заключение

Разработаны модели целевых функций поставщика и ритейлера на основе контракта распределения выручки с учетом трансфертной цены при степенных функциях спроса и линейных функциях издержек. Сформированы оптимальные механизмы поставщика и ритейлера, позволяющие определить объемы поставки, максимизирующие целевые функции агентов. Разработаны два метода согласования интересов поставщика и ритейлера. Первый метод согласования интересов основан на распределении выручки исходя из равенства оптимальных объемов продаж агентов. Второй метод

согласования интересов поставщика и ритейлера базируется на равенстве максимальной прибыли. Сравнение применения этих методов приводит к следующим выводам:

- при первом методе согласованные объемы поставок одинаковы, однако максимальные значения прибыли агентов существенно различаются;
- второй метод обеспечивает равенство максимумов прибыли агентов, но оптимальные объемы поставки различны;
- в целях скоординированного взаимодействия поставщика и ритейлера целесообразно использовать первый метод, но для обеспечения заинтересованности агента с меньшей прибылью возможно перераспределение прибыли.

## Литература

1. Чечулин В. Л., Черепанова Ю. А., Курыгин А. А. Экономическое равновесие (структуры и модели): монография. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2018. – 180 с.
2. Ahn I. Profit transfer within a vertical relationship // *Journal of Economic Theory and Econometrics*. 2017. – Vol. 28(4). – P. 61-99.
3. Buratto A., Cesaretto R., De Giovanni P. Consignment contracts with cooperative programs and price discount mechanisms in a dynamic supply chain // *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 218. Pp. 72-82.
4. De Giovanni P., Genç T.S. Coordination in closed-loop supply chain with price-dependent returns// *International Series in Operations Research and Management Science*. 2020. – Vol. 280. – P. 87-113.
5. Fang Z., Huang L., Wierman A. Prices and subsidies in the sharing economy// *Performance Evaluation*. 2019. – Vol. 136. – P. 102037.
6. Liu R., Dan B., Zhou M., Zhang Y. Coordinating contracts for a wind-power equipment supply chain with joint efforts on quality improvement and maintenance services // *Journal of Cleaner Production*. 2020. – Vol. 243. – P. 118616.
7. Lv F., Xiao L., Xu M., Guan X. Quantity-payment versus two-part tariff contracts in an assembly system with asymmetric cost information // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. – Vol. 129. – P. 60-80.
8. Madden P. Collective Bargaining in a Basic North American Sports League Model With Broadcasting Revenue // *Journal of Sports Economics*. 2019. – Vol. 20. – No. 8. – P. 1088-1118.
9. Tsao Y.-C., Lee P.-L. Employing revenue sharing strategies when confronted with uncertain and promotion-sensitive demand // *Computers and Industrial Engineering*. 2020. – Vol. 139. – P. 106200.
10. Wang N., Fan Z.-P., Zhao X. Coordination in competitive dual sales channels of the mobile phone industry // *International Transactions in Operational Research*. 2020. – Vol. 27. – No. 2. – P. 984-1012.
11. Zhao J., Zhou Y.-W., Cao Z.-H., Min J. The shelf space and pricing strategies for a retailer-dominated supply chain with consignment based revenue sharing contracts // *European Journal of Operational Research*. 2020. – Vol. 280. – No. 3. – P. 926-939.
12. Song Z., He S., An B. Decision and coordination in a dual-channel three-layered green supply chain // *Symmetry*. 2018. – Vol. 10. – No. 11. – P. 549.
13. Гераськин М.И. Оптимизация взаимодействий в мультиагентной сильносвязанной системе «ритейлер-банк-страховщик» // *Проблемы управления*. – 2015. – №4. – С.9-18.
14. Geraskin M. Pricing analysis of interconnected markets of housing, mortgage lending and insurance // *Kybernetes*. 2020. – Vol. 50 – No. 5. – P. 1212-1249.
15. Гераськин М.И., Иванова М.В. Моделирование взаимодействий институтов рынков жилья на основе степенных, экспоненциальных и логарифмических функций издержек // *Управление большими системами*. 2023. – Выпуск 101. – С. 64-85.

*Научное электронное издание*

**ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ  
СИСТЕМ – 55 ЛЕТ  
(ТАС-55)**

**ТРУДЫ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

(18 НОЯБРЯ 2024 г., МОСКВА, РОССИЯ)

*Под общей редакцией академика РАН Новикова Д.А., д.т.н. Буркова В.Н.*

Локальное электронное издание

---

**Минимальные системные требования:**

Pentium 4; 1,3 ГГц и выше, Windows 7/8 и выше; Acrobat reader 4.0 и выше

Дата подписания к использованию 25.11.2024

1 электронно-оптический диск (CD-R), 6,9 Мб, Тираж 100 экз.

---

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

Российской академии наук

117997, Россия, Москва,

ул. Профсоюзная, д. 65

[www.ipu.ru](http://www.ipu.ru)