

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

# **УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ**

***Выпуск 48***  
***Март 2014***

**СБОРНИК  
ТРУДОВ**

ISSN 1819-2467

Регистрационный номер Эл. №ФС77-44158 от 09 марта 2011 г.

**Москва – 2014**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
*Институт проблем управления*  
*им. В.А. Трапезникова*

**УПРАВЛЕНИЕ  
БОЛЬШИМИ  
СИСТЕМАМИ**

**СБОРНИК ТРУДОВ**

*Выпуск 48*

**Москва – 2014**

### КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ

Академики РАН: Васильев С.Н., Емельянов С.В., Куржанский А.Б., Федосов Е.А., Черноушко Ф.Л.; члены-корреспонденты РАН: Желтов С.Ю., Каляев И.А., Пархоменко П.П., Попков Ю.С.; д-ра техн. наук: Дорофеев А.А., Кузнецов О.П., Кульба В.В., Кротов В.Ф., Лотоцкий В.А., Павлов Б.В., Поляк Б.Т., Рутковский В.Ю.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор:** член-корр. РАН Новиков Д.А. **Отв. секретарь:** канд. техн. наук Губко М.В. **Редактор:** канд. техн. наук Квинто Я.И. **Техн. редактор:** канд. техн. наук Куливец С.Г.

Д-ра техн. наук: проф. Алескеров Ф.Т. (ГУ ВШЭ), проф. Артамонов Е.И. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Архипова М.Ю. (ИПИ РАН), д-ра техн. наук: проф. Афанасьев В.Н. (МИЭМ), проф. Бахтадзе Н.Н. (ИПУ РАН), проф. Бурков В.Н. (ИПУ РАН), проф. Вишневский В.М. (ИППИ РАН), д-р экон. наук, проф. Голиченко О.Г. (ЦЭМИ РАН), д-р физ.-мат. наук, проф. Добровидов А.В. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук: проф. Заложнев А.Ю. (ИПУ РАН), проф. Ириков В.А. (МФТИ), проф. Калянов Г.Н. (ИПУ РАН), проф. Касаткин С.И. (ИПУ РАН), проф. Каравай М.Ф. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Клочков В.В. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук: проф. Кононенко А.Ф. (ВЦ РАН), проф. Курдюков А.П. (ИПУ РАН), проф. Лебедев В.Г. (ИПУ РАН), к-т техн. наук, доцент Лебедев В.Н. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Ловчиновский Э.В. (ИПУ РАН), д-р техн. наук, проф. Мандель А.С. (ИПУ РАН), д-р физ.-мат. наук, проф. Непейвода Н.Н. (ИПС РАН), д-р экон. наук, проф. Нижегородцев Р.М. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук: проф. Новосельцев В.Н. (ИПУ РАН), проф. Орлов А.И. (МВТУ), д-р физ.-мат. наук, проф. Рапопорт Л.Б. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Секерин В.Д. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук: проф. Сидельников Ю.В. (МАИ), проф. Совлуков А.С. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Сухарев О.С. (Ин-т экономики РАН), д-ра техн. наук: проф. Уткин В.А. (ИПУ РАН), проф. Хоботов Е.Н. (МВТУ), д-ра физ.-мат. наук: доцент Чеботарев П.Ю. (ИПУ РАН), проф. Чхартишвили А.Г. (ИПУ РАН), проф. Щербаков П.С. (ИПУ РАН).

### РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДАКЦИОННЫЕ СОВЕТЫ

**Волгоград** – д-ра физ.-мат. наук: проф. Воронин А.А., проф. Лосев А.Г. (ВолГУ); **Воронеж** – д-р техн. наук, проф. Баркалов С.А., д-р физ.-мат. наук, проф. Головинский П.А. (ВГАСУ), д-р техн. наук, проф. Подвальный С.Л. (ВГТУ); **Иркутск** – академик РАН Бычков И.В., проф. Лакеев А.В. (ИДСТУ СО РАН); **Казань** – д-р физ.-мат. наук, проф. Маликов А.И., д-р техн. наук, проф. Сиразетдинов Р.Т. (КГТУ-КАИ); **Липецк** – д-ра техн. наук: проф. Кузнецов Л.А., проф. Погодаев А.К. (ЛГТУ); **Самара** – д-ра экон. наук: проф. Богатырев В.Д., проф. Гераскин М.И., д-р техн. наук, проф. Засканов В.Г. (СГАУ); **Петрозаводск** – д-р физ.-мат. наук, проф. Мазалов В.В., д-р техн. наук, доц. Печников А.А. (ИПМИ КарНЦ РАН); **Санкт-Петербург** – д-ра физ.-мат. наук: проф. Петросян Л.А. (СПбГУ), проф. Фрадков А.Л. (ИПМ РАН); **Старый Оскол** – д-р техн. наук, проф. Еременко Ю.И. (СТИ); **Тверь** – д-ра техн. наук: проф. Кузнецов В.Н., проф. Палюх Б.В. (ТГТУ).

**Адрес редакции:** 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

**Адрес в Интернет:** [ubs.mtas.ru](http://ubs.mtas.ru).

Номер гос. регистрации электронного научного издания (ЭНИ): 0421200023.

© ИПУ РАН, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

## *Системный анализ*

---

- Подвальный С. Л., Васильев Е. М.**  
*Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы.....* 6
- Усков А. А., Киселев И. А.**  
*Связь арифметики нечётких чисел с арифметикой кватернионов и её применение при анализе систем управления .....* 59

## *Информационные технологии в управлении*

---

- Козлов С. В., Остриков Ю. П., Суханов А. Л.**  
*Оптимальное распределение информационно-вычислительных ресурсов на основе двухуровневого критерия.....* 71
- Котельников А. В., Лебедев В. Б.**  
*Применение методов теории решёток для обработки информации в системах обнаружения объектов .....* 85
- Наумов И. С., Выхованец В. С.**  
*Оценка трудности и сложности учебных задач на основе синтаксического анализа текстов.....* 97

## *Сетевые модели в управлении*

---

- Мыльников Л. А., Максимов А. П.**  
*Способ учёта социальных факторов при принятии решений в социально-экономических системах на основе данных социальных сетей.....* 132

## *Управление в социально-экономических системах*

---

- Акинфиев В. К.**  
*Выбор инвестиционных решений при трансфере западных технологий в отрасли транспортного машиностроения .....* 151

**Смирнова Н. В.**

*К автоматизированной проверке решений одного класса задач в следящих интеллектуальных обучающих системах.....*

172

***Управление техническими системами и технологическими процессами***

---

**Кушников В. А., Щербаков М. А.**

*Задачи, модели и алгоритмы системы управления производством листового стекла .....*

198



УДК 62-50:681.5  
ББК Ж 30

## **МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОТКРЫТЫМИ СИСТЕМАМИ: КОНЦЕПЦИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Подвальный С. Л.<sup>1</sup>, Васильев Е. М.<sup>2</sup>**  
(Воронежский государственный технический  
университет, Воронеж)

*Рассматриваются предпосылки, состояние и перспективы развития концепции многоальтернативности в задачах автоматического управления динамическими системами. Показано, что эта концепция, отвечая известному информационному принципу необходимого разнообразия У. Эшби, объединяет собою эволюционные механизмы открытых биологических систем, обеспечивая последним высокую степень приспособительного, адаптивного взаимодействия с внешней средой. Приведены различные примеры реализации технических систем многоальтернативного управления, подтверждающие ожидаемое из биологических аналогий возникновение в них свойств робастности и целевую эффективность. Сформирована общая функциональная схема многоальтернативных систем управления, построена соответствующая математическая модель и проанализированы перспективы их совершенствования в классе интеллектуальных управляющих систем.*

Ключевые слова: многоальтернативные системы, интеллектуальное управление, адаптивное поведение.

---

<sup>1</sup> Семён Леонидович Подвальный, доктор технических наук, профессор (spodvalny@yandex.ru).

<sup>2</sup> Евгений Михайлович Васильев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (vgtu-aits@yandex.ru).

На основе принципов эволюции и функционирования биологических открытых систем, их близости к идеям кибернетики и системного анализа в 1977–1980 годах в работах [61, 62, 64] впервые была сформулирована концепция многоальтернативности структур технических и социально-экономических информационно-управляющих систем широкого назначения.

В обзоре [67] подведены итоги развития этой концепции за прошедшие три с половиной десятилетия и дана классификация сложившегося к настоящему времени многообразия таких систем на разных уровнях их обеспечения – аппаратном, программном и алгоритмическом – применительно к задачам моделирования и управления; обработки информации; принятия решений; проектирования, тестирования и разработки программного обеспечения. Однако уровень аппаратной реализации, включающий крупный класс систем автоматического управления, из-за его большого объема был рассмотрен очень кратко. Согласно [67], под многоальтернативными системами управления понимаются такие информационно-управляющие системы, в которых наиболее важные функции сбора, обработки и выдачи информации реализуются несколькими альтернативными способами. Настоящая работа содержит более подробное изложение возможностей применения идеи многоальтернативности в задачах автоматического управления открытыми динамическими системами.

## **1. Введение в проблему**

Открытые системы любой природы, необходимым условием функционирования которых является активное взаимодействие с внешней средой [10], характеризуются, как объекты управления, рядом достаточно очевидных свойств:

- высокая и чаще всего неизвестная размерность пространства внутренних состояний, включая неопределённое количество иерархических уровней, подсистем и связей между ними;
- нестационарность структуры и параметров;
- нелинейность процессов;



– разнообразный вид и диапазоны изменения внешних воздействий.

Изменчивость и разнообразие режимов и условий работы открытых систем приводят к структурным, параметрическим и сигнальным неопределённостям их формального описания. В связи с этим теория автоматического управления такими системами развивалась по пути создания адаптивных и робастных методов, обеспечивающих низкую чувствительность, или грубость замкнутых систем к указанным изменениям [8, 19, 30, 48, 49, 58, 60, 70, 71, 89, 91, 100].

В наиболее общем виде для объекта [55]

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)[w(x,t)^T \theta + u] + \delta(t), \\ y &= h(x); \end{aligned}$$

где  $x$ ,  $u$ ,  $y$  – векторы состояния, управления и регулируемого выхода;  $f(x)$  – характеристическая матрица;  $g(x)$ ,  $h(x)$  – матрицы управления и выхода;  $\theta$  – вектор неизвестных факторов объекта;  $w(x, t)$  – некоторая известная матричная функция;  $\delta(t)$  – неизменяемые внешние воздействия, простейший алгоритм параметрической ( $\theta = \text{const}$ ) адаптивной стабилизации по состоянию при отсутствии внешних воздействий ( $\delta(t) = 0$ ) может быть записан в виде:

$$(2) \quad \begin{aligned} u &= u_0(x) - w(x,t)^T \hat{\theta}, \\ \dot{\hat{\theta}} &= \gamma w(x,t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x); \end{aligned}$$

в котором  $V(x)$  – выбранная определённым образом функция Ляпунова;  $\gamma$  – постоянный коэффициент;  $u_0(x)$  – обратная связь по состоянию. Подстановка управления  $u$  из (2) в (1) обеспечивает прямую компенсацию влияния вектора неопределённостей  $\theta$  на систему.

Этот алгоритм обеспечивает нулевую установившуюся ошибку, но при наличии возмущений ( $\delta(t) \neq 0$ ) интегральный закон адаптации (2) приводит к неограниченному параметрическому дрейфу управления  $u$ , и тогда переходят к адаптивной робастной стабилизации ( $\sigma$ -модификации алгоритма (2)) [89, 105, 106]:

$$(3) \quad \dot{\hat{\theta}} = \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) - \sigma \hat{\theta},$$

( $\sigma = \text{const}$ ) обеспечивающей работоспособность системы при наличии внешних воздействий ( $\delta(t) \neq 0$ ) и параметрической нестационарности ( $\theta = \theta(t)$ ), однако с ненулевой установившейся ошибкой.

В тех случаях, когда имеет место функциональная неопределённость (вектор  $\theta = \theta(x, u, t)$  является неизвестной функцией  $x$  и  $u$ ) и присутствуют внешние воздействия ( $\delta(t) \neq 0$ ), задача адаптации решается статической обратной связью [59, 109]:

$$(4) \quad \hat{\theta} = \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x),$$

или [27]:

$$(5) \quad \hat{\theta} = \gamma |w(x, t)|^2 \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x),$$

при этом ненулевая установившаяся ошибка по-прежнему не устраняется.

Поскольку ни один из алгоритмов (2)–(5) в полной мере не отвечает реальным задачам управления, то для обеспечения нулевой установившейся ошибки при наличии неконтролируемых внешних возмущений ( $\delta(t) \neq 0$ ) и функциональной неопределённости ( $\theta = \theta(x, u, t)$ ) используются так называемые робастно-адаптивные алгоритмы с переключающей функцией  $\sigma(\hat{\theta}_2)$  [55, 116]:

$$\hat{\theta}_1 = \gamma_1 w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x),$$

$$(6) \quad \dot{\hat{\theta}}_2 = \gamma_2 w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) - \sigma(\hat{\theta}_2) \cdot \hat{\theta}_2,$$

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2;$$

представляющие собою модифицированную комбинацию алгоритмов (2)–(4).

Если рассмотреть группу методов адаптации не по координатам состояния  $x$  объекта, а по вектору выхода  $y$ , то хронологически можно аналогично проследить:

– последовательное их усложнение от задач простейшей параметрической стабилизации (2) к алгоритмам робастно-адаптивного типа (6);

– преодоление проблемы высокой относительной степени  $p > 1$  ( $p$  – разность порядка знаменателя  $n$  и порядка числителя  $m$  передаточной функции объекта:  $p = n - m$ );

– привлечение процедур параметризации модели объекта [55, 59, 110] (представление модели объекта в виде слагаемых, линейных по настраиваемым параметрам регулятора, даёт возможность вычисления градиента функционала качества по этим параметрам и воспользоваться, например, настройкой по скоростному градиенту).

В результате были созданы методы адаптации высокого порядка, а также более совершенные итеративные методы обхода интегратора. Динамический порядок регуляторов, реализующих эти методы, составляет  $2n(2p - 1) - 2$  и  $3n + m + 2$  соответственно [55] и в несколько раз превышает исходный порядок объекта. За исключением простейших случаев [23], указанные алгоритмы требуют значительных вычислительных ресурсов и неприемлемы для промышленной реализации [55]. В работах [9, 35] констатируется, что в теории адаптивных систем «в практику внедряется лишь ничтожная доля теоретических достижений», и указывается на «плохую реализацию на практике имеющихся схем адаптивного управления» из-за их громоздкости и сложности.

В связи с этим в настоящее время исследования в области адаптивного управления направлены:

– на получение более простых универсальных алгоритмов, в том числе и чисто робастных – не содержащих процедур адаптации и идентификации [9, 35, 55, 59];

– создание комбинированных методов по аналогии с (6), сочетающих в себе различные алгоритмы [12, 24, 80];

– разделение сложной задачи адаптации на иерархически организованную совокупность простых подзадач, решаемых последовательно для каждой координаты состояния объекта [20, 45].

Принципиально нерешённой остаётся проблема структурной неопределённости объекта, чаще называемая немоделируе-

мой, или паразитной динамикой: необходимым условием для построения алгоритмов адаптивного и робастного управления является априорная известность порядка объекта  $n$  и его относительной степени  $p$ . Об информационных и энергетических ограничениях, возникающих при реализации этих алгоритмов на практике, отмечается также в [42].

Сложившееся противоречие между теорией и практикой робастно-адаптивного управления объясняется тем, что его развитие направлено на расширение границ неопределённости нашего представления об управляемой системе. Такой подход, безусловно, нашёл своё применение на практике. В то же время общая методология теории управления придерживается другого пути, в рассматриваемом смысле противоположного указанному: разработка способов управления объектами должна опираться на глубокое изучение протекающих в них процессов и условий функционирования [46, 54]. Эта методология оформилась в настоящее время в синергетический подход к задачам управления: в открытых системах, обменивающихся с внешней средой информацией, веществом и энергией, доминирующую роль играют процессы взаимодействия элементов системы, и синтез управления такими системами сводится к организации этого взаимодействия с максимальным учётом естественных свойств объекта [43]. С ростом сложности объектов значимость синергетических методов управления возрастает, поскольку такие объекты приобретают качественно новые – общесистемные свойства, отсутствующие у простой совокупности отдельных элементов. В частности, неопределённость, как мера нашего незнания, является всего лишь отражением общесистемной способности многовариантного функционирования сложного объекта в условиях его открытого взаимодействия с внешней средой.

Иными словами, параметрическую или структурную нестационарность системы и изменчивость её динамического порядка следует рассматривать как качественные изменения способа её функционирования в соответствии с изменившимися внешними условиями.

Отсюда вытекает возможность расширения концептуального подхода к построению законов управления открытыми си-

стемами: от создания сложных универсальных алгоритмов, охватывающих несколько видов неопределённостей и обеспечивающих вследствие этого достижение цели управления при изменчивости свойств объекта, перейти к концепции многоальтернативного управления (от лат. *alternare* – чередовать), имеющего в своём распоряжении множество специализированных алгоритмов (в том числе робастно-адаптивных), применяемых в разных состояниях системы.

Обсуждению этой концепции посвящён предлагаемый обзор.

## **2. Биологические аналогии**

Обращение к биологическим аналогиям задач управления является приёмом, восходящим к основополагающей идее кибернетики, сформулированной Н. Винером в виде тезиса о подобии процессов управления и связи в машинах, живых организмах и обществах [26].

Антропогенные (создаваемые человеком) системы управления в той или иной степени копируют живую природу, стремясь найти некоторые фундаментальные принципы, использование которых позволит реализовать в этих системах обсуждаемые здесь механизмы их активного взаимодействия с внешней средой.

### **2.1. ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ**

Важнейшей предпосылкой существования и эволюции биологических систем в условиях влияния внешней среды является достаточное и даже избыточное разнообразие её таксонов, благодаря которому в ситуациях, когда изменение среды обитания становится неблагоприятным для существования какого-либо элемента системы, его место занимают одна или несколько других биологических групп, способных восстановить нарушившееся равновесие в системе, например – непрерывность пищевой цепочки [1, 28, 29, 95]. Более того, в работе [102] отмечалось, что при наступлении экологического кризиса, когда под угрозой исчезновения находится вся достаточно крупная

биологическая система, в последней наблюдается усиленный рост числа новых таксонов и поиск среди них приемлемого варианта для восстановления равновесия в биосфере.

Мерой разнообразия внутри одного таксона может являться информационная энтропия по Шеннону [64, 94]:

$$(7) \quad H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i; \quad p_i = \frac{N_i}{N}; \quad N = \sum_{i=1}^n N_i;$$

где  $n$  – количество элементов в таксоне, например, видов;  $N_i$  – мощность элемента  $i$  таксона (численность вида  $i$ ),  $i = 1, \dots, n$ . Предложена также более удобная для сравнительных оценок мера вариабельности – коэффициент многоальтернативности  $\mu$ , отражающий, в отличие от (7), не абсолютную, а относительную возможность выбора [67]:

$$(8) \quad \mu = \frac{H}{H_{max}} = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i}{\log_2 N}.$$

Если рассматривать последствия межэлементного взаимодействия биологической системы, то конкуренция и естественный отбор, приводящие, например, к сокращению внутривидового разнообразия, одновременно сопровождаются компенсационным ростом разнообразия родов, т.е. разнообразия более высокого иерархического уровня биосистемы.

Эмпирически установлено, что в типичном биологическом семействе имеется много родов с немногими видами в каждом роде и немного родов с большим количеством видов [29], например [6]: в 13-ти семействах отряда Gruiformes журавлеобразных 51 род содержит 1...3 вида, 10 родов – 4...10 видов и только 5 родов включает более 10 видов птиц (таксономические уровни в биологии: вид, род, семейство, отряд, класс, тип).

## 2.2. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПРИСПОСОБИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Переходя к приспособительным механизмам отдельных уровней системы, выделим механизм специализации и разделения функций, обеспечивающий устойчивое существование таксона в разнообразных экологических нишах.

В [29] приводится пример отряда жуков Coleoptera, видовое разнообразие которых составляет пятую часть всех видов живых организмов на Земле, обладающих уникальным примером разделения функций между парами крыльев: передние жёсткие надкрылья придают телу жука прочность и компактность, целесообразные для передвижения в воде, почве или древесине, а мягкие задние крылья – способность к полёту.

Подобное разделение функций было обнаружено у рыб, для которых характерны миграции море–река–море, в ходе которых они сталкиваются с существенным изменением солёности воды и необходимостью перестройки способа поддержания своего водно-солевого баланса.

В работах [81, 82] на примере сравнения нескольких видов таких рыб показано, что наилучшая приспособленность к изменению солёности наблюдается у видов с активной стратегией адаптации, при которой происходит полная смена типа осморегуляции. Такая осмоконформность оказалась возможной благодаря постоянному наличию в жаберном эпителии рыб ионофильтрующих клеток (ионоцитов) как морского, так и пресноводного типов. В зависимости от солёности окружающей среды активизируется соответствующий тип клеток.

Аналогичным примером является эволюция зрения животных, перешедших от ночного образа жизни к дневному. Этот переход привёл к появлению у приматов двух типов светочувствительных клеток: высокочувствительных палочек, обеспечивающих сумеречное нецветовое зрение, и менее чувствительных, но приспособленных к различению цветов – колбочек [107]. Такое разделение функций зрительных рецепторов позволило существенно расширить экологическую нишу высших млекопитающих.

### *2.3. БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУР*

Говоря о роли разделения функций в механизмах эволюции, следует отметить, что этот механизм проявляется уже на молекулярном уровне простейших систем в виде блочного принципа формирования новых структур из уже «опробован-

ных», т.е. жизнеспособных биологических блоков, имеющих специализированные функции [44, 74, 75].

Блочный принцип формирования биологических систем хорошо согласуется с гипотезой М. Эйгена о решающем значении матричной репликации в процессе появления жизни [96, 97]. С точки зрения эволюции на основе матричной репликации для успешного продолжения довидовой самоорганизации важна не степень приспособленности системы, а её самоинструктирующая способность к дальнейшему безошибочному репликационному росту – селективная ценность.

В биологических, а также в химических системах такая селективная ценность системы может определяться как разность энергии взаимодействия комплементарных и некомплементарных пар элементов – блоков системы. Эта гипотеза находит своё подтверждение в законе гомологических рядов Н.И. Вавилова [11], обнаруженным им на уровне уже видового разнообразия биологических систем: у близких видов в процессе эволюции возникают одни и те же варианты признаков, причем параллелизм изменчивости проявляется в самых разных условиях существования видов. Следовательно, генетическая система направляет комбинаторные перестройки в хромосомах помимо влияния внешней среды. По мнению С.В. Мейена [52], источником параллелизма является структурная организация и взаимодействие элементов, т.е. их системность.

Примечательно, что взаимосвязанную специализацию и блочность биологических структур Л. Берталанфи относит к характерным внутренним свойствам открытых систем [7]: «Самодифференцирующиеся системы, развивающиеся в направлении все более высокой сложности (путем уменьшения энтропии), возможны – по термодинамическим соображениям – только как открытые системы. Дифференциация внутри развивающегося эмбриона или организма происходит согласно внутренним законам их организации. ... Закрытые системы развиваются в направлении гомогенности».

Обсуждая механизмы построения сложных открытых систем, Э.М. Галимов [28] отмечает, что «наиболее экономный способ производства низкоэнтропийного продукта состоит в



комбинировании уже имеющихся низкоэнтропийных структур, эволюция в нашем понимании должна происходить не только и даже не столько путем малых изменений, сколько скачками, обусловленными новыми сочетаниями старых структур», и, возражая сторонникам креационизма, противопоставляет постулату изначально «неупрощаемой сложности» [101] биосистем понятие «неусложняемой простоты», подчёркивая, тем самым, комбинаторную природу эволюции.

#### *2.4. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ*

Принцип блочно-модульной эволюции был распространён непосредственно на системы управления биологическим организмом [76]. В частности, в работе [86] рассматривается теория эволюционного усложнения биологических систем управления на основе последовательных метасистемных переходов: существующие подсистемы объединяются общим механизмом управления, в результате чего формируется система качественно нового иерархического уровня, которая, в свою очередь, является подсистемой более высокого уровня управления.

Широко известным примером иерархической организации приспособительных механизмов в биологических системах является процесс гомеостаза [98], который осуществляется в общем плане за счёт системы управления с двумя и более иерархическими уровнями, одни из которых непрерывно поддерживают заданное состояние организма при небольших изменениях в окружающей среде, а другие реагирует только на критические отклонения этого состояния и запускают, при появлении таких отклонений, механизмы существенной перестройки организма, которые носят качественно новый характер, в частности, могут быть прерывистыми, ступенчатыми, порождающими альтернативные структуры управления (У. Эшби в [98] приводит пять (!) независимых механизмов стабилизации содержания глюкозы в крови человека).

Такая иерархия управления в результате накопления, наращивания фонда приспособлений образует многослойный защитный «пояс», предохраняющий от непредвиденных изменений окружающей среды [44]. При этом подразумевается

существование у организма развитой системы информационного обеспечения сведениями об условиях функционирования.

Рассматриваемый многоальтернативный подход к управлению в открытых системах сформулирован У. Эшби в виде информационного принципа необходимого разнообразия [99]: «Только многообразие может уничтожить многообразие», – согласно которому дискретное разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия управляемого объекта. Непревзойдённым примером многообразия состояний системы управления является нервная система человека, информационная ёмкость которой составляет около  $10^{13}$  битов [95, 112] и на несколько порядков превосходит многообразие его генов, рис. 1.

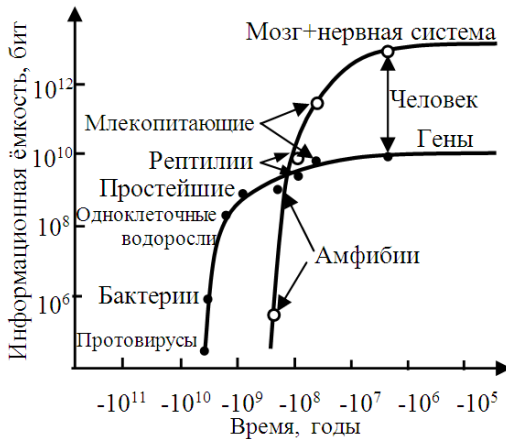


Рис. 1. Развитие генетической и нейронной информационной ёмкости в ходе биологической эволюции [112]

Последнее обстоятельство в контексте нашего анализа иерархической организации биологических систем позволяет отнести нервную систему к оперативному управлению ассоциативного типа на уровне конкретной биологической особи, а механизм генной адаптации – к механизму управления селективной ценностью и естественным отбором на более высоком, но обладающем меньшим разнообразием видовом уровне.

Представленный анализ биологических аналогий многоальтернативного управления является далеко не полным (в энциклопедии [4] можно найти несколько сот подобных примеров), но позволяет аргументированно заключить, что открытые биологические системы достигли высокой степени приспособительного, адаптивного взаимодействия с внешней средой путём селективной специализации этого взаимодействия на основе набора достаточно простых механизмов разделения функций, модульности и иерархичности структуры, и не испытывают ограничений, связанных с растущей функциональной сложностью организмов. Эти приспособительные механизмы объединяются единой концепцией многоальтернативности и, следуя [69], составляют принцип 3М: «модульность – многоуровневость – многоальтернативность».

Использование этой концепции в задачах управления открытыми техническими системами принципиально снимает противоречие между сложностью функционирования всей системы управления в целом и её отдельных элементов в силу «неусложняемой простоты» реализации последних и возможности их выбора из необходимого множества альтернатив.

### **3. Техническая реализация**

С целью наглядного сопоставления примеров технической реализации систем многоальтернативного управления с их биологическими прототипами сгруппируем эти системы по способу выбора альтернатив:

– детерминированный выбор варианта управления из конечного множества альтернатив одного уровня иерархии, соответствующий наименее гибкому, но в то же время высшему уровню адаптивной специализации открытых систем;

– случайный выбор с последующим кратковременным сохранением (запоминанием) из конечного или бесконечного множества альтернатив нескольких уровней иерархии – соответствует гомеостазису с адаптацией;

– существенно неопределённая стратегия выбора управления из бесконечного множества иерархически организованных

альтернатив, соответствующая ассоциативным формам адаптации с запоминанием (предвидением), свойственным организмам с развитой нервной системой.

### 3.1. СИСТЕМЫ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ ВЫБОРОМ УПРАВЛЕНИЯ

Эффективность многовариантного управления даже в простейших его видах осознана достаточно давно. В работах [67, 88] отмечалось, что ещё в 1957 г. А.М. Лётовым [50] было предложено изменять знак обратной связи в регуляторе, т.е. изменять его структуру, выбирая одну из двух альтернатив в зависимости от текущего значения регулируемой величины. Развитие работ в этом направлении привело к созданию теории систем с переменной структурой [36, 87], в рамках которой остановимся на классическом примере, иллюстрирующем робастно-адаптивные свойства этих систем.

В [36] рассматривается структурно неустойчивая система (9)  $\ddot{\varphi}(t) + kb\varphi(t) = kbg(t)$ ,

в которой  $\varphi$  – регулируемая координата;  $g$  – задающее воздействие;  $k, b$  – параметры системы, причём  $b$  может быть нестационарным (к подобным системам можно отнести, например, систему ориентирования углового положения космического корабля). В зависимости от значения произведения  $kb$  фазовые траектории её движения имеют вид, представленный на рис. 2 (штриховые линии), и при любых значениях  $kb$  соответствуют незатухающим гармоническим колебаниям с частотой  $\omega = \sqrt{kb}$ .

Анализ рис. 2 показывает, что выбрав некоторые значения  $k_1$  и  $k_2$  так, чтобы  $k_1b > 1$ , а  $k_2b < 1$ , и принимая в нечётных квадрантах  $k = k_1$ , а в чётных  $k = k_2$ , получим асимптотически сходящуюся траекторию движения. Иными словами, стабилизация системы достигается путём детерминированного переключения вариантов её структуры в зависимости от текущего состояния. Переключающая функция  $S = \varphi \cdot \dot{\varphi}$  представляет собою поверхность  $S = 0$ :

$$(10) \begin{cases} \ddot{\varphi}(t) + k_1b\varphi(t) = k_1bg(t) & \text{при } S > 0, \\ \ddot{\varphi}(t) + k_2b\varphi(t) = k_2bg(t) & \text{при } S \leq 0. \end{cases}$$

Устойчивость системы (10) сохраняется в диапазоне изменения нестационарного параметра  $b$ , не нарушающем условий  $k_1 b > 1$  и  $k_2 b < 1$ , и если этот диапазон известен, она всегда может быть обеспечена соответствующим выбором  $k_1$  и  $k_2$ .

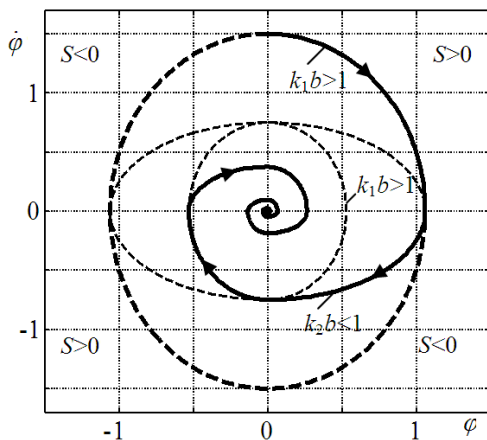


Рис. 2. Фазовые траектории системы с робастной устойчивостью в заданном диапазоне  $b$

Изменяя в системе (10) набор вариантов структуры и вид поверхности  $S$ , можно создать устойчивое скользящее движение по этой поверхности, не зависящее от параметров системы, т.е. обеспечить не только стабилизацию, но и частичную робастность траекторий системы [87], например:

$$(11) \begin{cases} \ddot{\varphi}(t) + kb\varphi(t) = kbg(t) & \text{при } S > 0, \\ \ddot{\varphi}(t) - kb\varphi(t) = kbg(t) & \text{при } S < 0; \end{cases}$$

где варианты структуры отличаются знаком обратной связи, а переключающая функция имеет вид:

$$(12) S = c\dot{\varphi} + \varphi,$$

в котором константа  $c$  не зависит от параметров системы. На рис. 3 уравнение  $S = 0$  представляет собою прямую, содержащую отрезок скольжения  $fd$ , при попадании на который траектория движения системы определяется только видом  $S$ , и в данном случае приобретает монотонный характер.

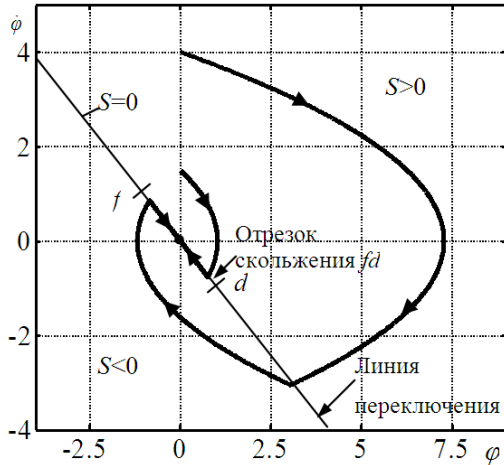


Рис. 3. Фазовые траектории системы, робастной на участке скольжения  $fd$

Следует отметить, что демонстрируемые в указанных примерах свойства робастности систем реализуются в полной мере только при возможности контроля или наблюдения полного вектора координат её состояния.

В качестве системы с переменной структурой можно привести также пример нелинейного фильтра, структурная схема которого показана на рис. 4 [53, 57]:

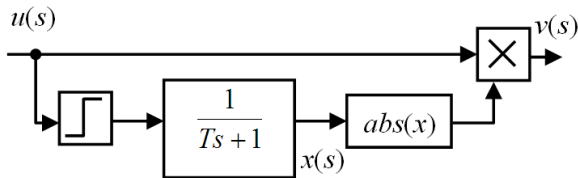


Рис. 4. Структурная схема нелинейного корректирующего фильтра

Для этого фильтра

$$v(t) = u(t) \cdot |x(t)|,$$

$x(t)$  является решением уравнения:

$$T\dot{x}(t) + x(t) = \text{sign}[u(t)],$$

$T$  – постоянный параметр.

Для первой гармоники входного сигнала  $u(t) = A \sin(\omega t)$  комплексный коэффициент передачи  $\tilde{W}(A, \omega)$  рассматриваемого фильтра имеет вид

$$\tilde{W}(A, \omega) = \tilde{P}(A, \omega) + j\tilde{Q}(A, \omega),$$

где  $\tilde{P}(A, \omega)$  и  $\tilde{Q}(A, \omega)$  – коэффициенты гармонической линеаризации [57]:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\omega) &= \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left( 1 + \frac{1}{3} \cos 2\theta \right); \\ (13) \quad \tilde{Q}(\omega) &= \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left( \frac{1}{3} \sin 2\theta \right); \end{aligned}$$

$$\theta(\omega) = \text{arctg}(-\omega T),$$

которые зависят только от частоты  $\omega$  входного сигнала и не зависят от его амплитуды  $A$ .

Сопоставление частотных характеристик линейного  $L_n(\omega)$ ,  $\varphi_n(\omega)$  и нелинейного  $L_h(\omega)$ ,  $\varphi_h(\omega)$  корректирующих устройств:

$$(14) \quad W_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad L_n(\omega) = 20 \lg W_n(\omega);$$

$$L_h(\omega) = 20 \lg \sqrt{\tilde{P}^2(\omega) + \tilde{Q}^2(\omega)}; \quad \varphi_h(\omega) = \arctg \frac{\tilde{Q}(\omega)}{\tilde{P}(\omega)},$$

с наиболее близкими функциями  $L_n(\omega)$  и  $L_h(\omega)$  дано на рис. 5 [18], из которого следует, что подавление высокочастотного диапазона спектра входного сигнала  $u(t)$  нелинейным фильтром выполняется эффективнее, чем в линейном, при вносимом запаздывании по фазе, не превышающем  $(-20)$  град.

Таким образом, использование переменной структуры позволяет реализовать корректирующие устройства, сочетающие в себе полезные свойства линейных систем – независимость характеристик от амплитуды сигналов с нелинейным свойством независимости фазовой и частотной характеристик. Расширяя

понятие независимости можно сказать о появлении у таких фильтров робастных свойств.

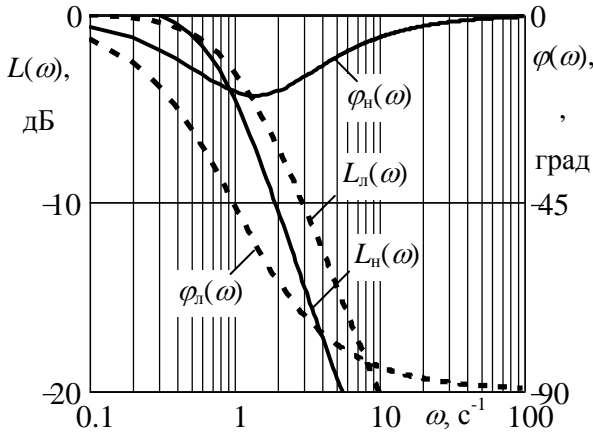


Рис. 5. Амплитудные и фазовые частотные характеристики линейного  $L_{л}(\omega)$ ,  $\varphi_{л}(\omega)$  и нелинейного  $L_{н}(\omega)$ ,  $\varphi_{н}(\omega)$  фильтров

Детерминированный выбор из небольшого числа альтернатив широко используется для программного управления различными объектами [13, 66, 67].

В качестве наиболее очевидного примера эффективности такого многоальтернативного программного режима можно привести алгоритм управления процессом тепловлажностной обработки бетонных изделий [25]. Этапы этой обработки (нагревание, выдерживание и остывание) характеризуются существенной нестационарностью процесса затвердевания бетона: неравномерное испарение воды затворения, изменение скорости конденсации пара, проявление экзотермического эффекта [5]. По этой причине традиционное одноканальное управления полной тепловой мощностью, подводимой к пропарочной камере, не обеспечивает точное соблюдение температурно-временного графика и требует большого количества переключений прецизионных паровых клапанов, существенно снижая, тем самым, срок их эксплуатации.



Разделение функций управления между тремя каналами – нерегулируемый канал подачи тепла (30% мощности) и два регулируемых канала: канал малой мощности  $W_m$ , работающий при небольших отклонениях фактической температуры  $T_\phi$  в камере от заданного значения  $T_3$ , и канал большой мощности  $W_6$ , подключаемый при больших ошибках, позволило повысить точность регулирования и вдвое снизить суммарное число переключений паровых клапанов во всех трёх каналах регулирования по сравнению с одноканальной системой. Процесс регулирования показан на рис. 6.

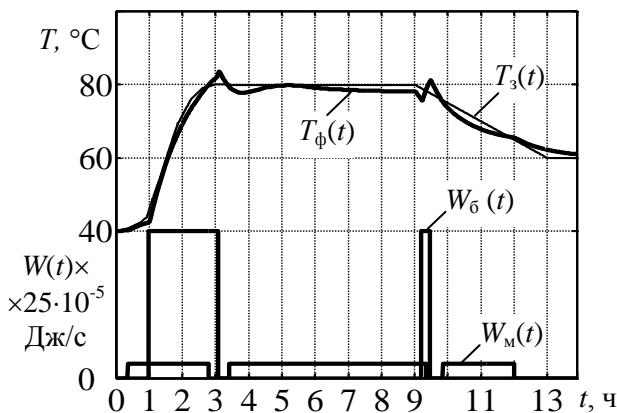


Рис. 6. Процесс регулирования в системе с тремя каналами подачи тепловой мощности

В задачах взаимосвязанного регулирования многомерными системами переход к альтернативным вариантам управления можно осуществлять по условию попадания некоторой обобщённой характеристики системы в различные, в общем случае пересекающиеся области  $\xi_0, \xi_1, \dots$  пространства регулируемых координат  $y = [y_1 y_2 \dots y_m]^T$ . В качестве такой характеристики обычно используют нормы [65, 66]:

$$N_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m \alpha_i (y_i - y_{i0})^2},$$

$$N_2 = \sum_{i=1}^m \alpha_i |y_i - y_{i0}|,$$

$$N_3 = \max_i |y_i - y_{i0}|,$$

в которых  $y_{i0}$  – номинальные (требуемые) значения регулируемых величин;  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты, определяющие вклад  $y_i$  в цель управления. Алгоритмы многоальтернативного взаимосвязанного управления многомерными процессами полимеризации приведены в работах [3, 33, 34, 63, 66].

В нелинейных динамических системах, характеризующихся множеством стационарных состояний: каталитические и химико-технологические системы [84], системы с широтно-импульсной модуляцией [37], термогидродинамические системы [56], многовариантность управления позволяет устанавливать и поддерживать в них качественно отличающиеся режимы функционирования. В работе [14] приводятся результаты исследования модели химической динамики, предложенной О.Е. Рёсслером [111]:

$$\dot{x}(t) = -y(t) - z(t),$$

$$(15) \quad \dot{y}(t) = x(t) + a \cdot y(t),$$

$$\dot{z}(t) = b \cdot x(t) - u(t)z(t) + x(t)z(t);$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  – координаты пространства состояний;  $a = 0,38$ ;  $b = 0,3$  – параметры системы;  $u(t)$  – управляющее воздействие.

На рис. 7 показаны фазовые портреты системы (15) с различным характером траекторий движения, выбор которых определяется целью управления.

В этой связи следует отметить, что возможность многоальтернативного управления стимулирует изучение ранее недоступных для использования режимов функционирования объектов и использование этих режимов для повышения качества технологических процессов.

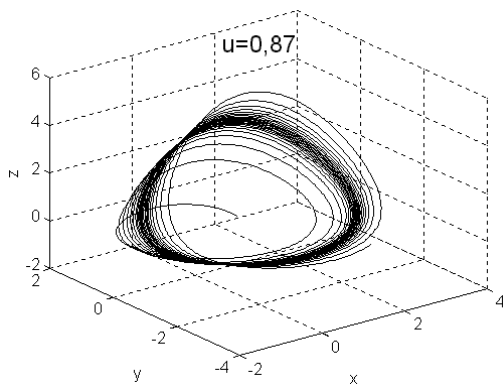


Рис. 7а. Режим неустойчивой работы системы (расходящиеся колебания),  $0 \leq u < 0,88$

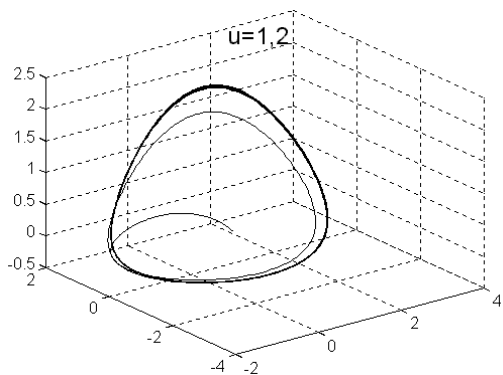
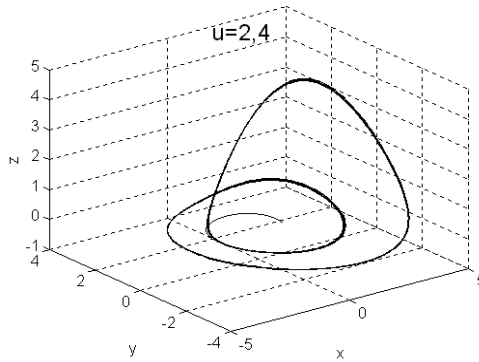
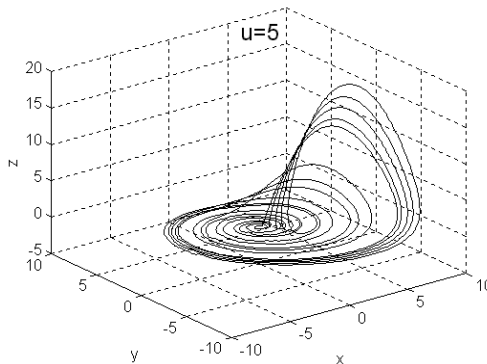


Рис. 7б. Режим устойчивых колебаний системы с предельным циклом первого порядка;  $0,88 \leq u < 2$



*Рис. 7в. Режим устойчивых колебаний системы с предельным циклом второго порядка;  $2 \leq u < 2,81$*



*Рис. 7г. Режим устойчивой работы системы с хаотическими колебаниями;  $2,81 \leq u$*

В работе [17] показана возможность повышения эффективности процесса теплообмена с помощью системы с переменной структурой, содержащей два замкнутых контура управления по отклонению дисперсии скорости частиц рабочей жидкости и предусматривающей переключение этих контуров для выбора режима регулирования плотности теплового потока, подводимого к теплообменнику.

Качественное отличие двух возможных режимов теплообмена (конвективного и хаотического) показано на рис. 8.

Результаты моделирования работы типового теплообменника с внутренним источником энергии показали, что использование хаотического режима по сравнению с конвективным позволило увеличить коэффициент теплопередачи на 17%.



Рис. 8а. Линии тока жидкости в установившемся режиме конвективного теплообмена

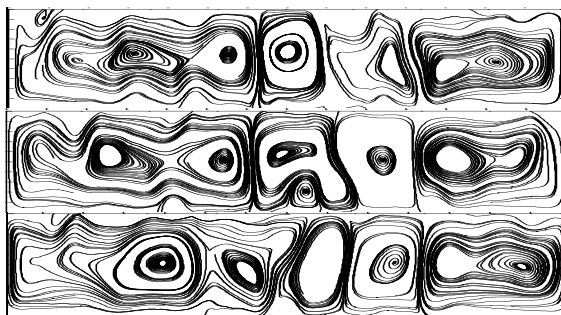


Рис. 8б. Линии тока жидкости в нестационарном режиме турбулентного теплообмена в последовательные моменты времени с интервалом 40 с

Дополнительные возможности, открываемые при использовании многоальтернативного детерминированного выбора управления, были обнаружены также при исследовании генераторов электрических колебаний, описываемых системой уравнений [13, 16, 32]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{1}{C_1} \cdot \left( (x_2 - x_1) \cdot \frac{1}{R} - f(x_1) \right), \\
 (16) \quad \dot{x}_2 &= \frac{1}{C_2} \cdot \left( (x_1 - x_2) \cdot \frac{1}{R} + x_3 \right), \\
 \dot{x}_3 &= \frac{1}{L} \cdot (e - x_2);
 \end{aligned}$$

где  $x_1, x_2$  – напряжения в определённых точках схемы;  $x_3$  – ток в цепи с индуктивностью  $L$ ;  $e(t)$  – эдс источника управляющего сигнала;  $f(x_1)$  – нелинейная зависимость тока от напряжения  $x_1$  с отрицательным дифференциальным сопротивлением:

$$\begin{aligned}
 f(x_1) &= -5 \cdot 10^{-4} x_1^6 - 1 \cdot 10^{-4} x_1^5 + 1,98 \cdot 10^{-2} x_1^4 + \\
 &+ 4,2 \cdot 10^{-2} x_1^3 - 0,18 x_1^2 - 1,12 x_1 + 0,56;
 \end{aligned}$$

$C_1, C_2, R$  – значения емкостей конденсаторов и сопротивление резистора соответственно.

В частности, в работах [13, 16] показано, что в нелинейных электрических цепях, подобных (16), возможно не только подержание двух режимов колебаний – периодических и хаотических, но существует дополнительная возможность формирования хаотических аттракторов различного вида (например, рис. 9), множество которых может составить алфавит кодирования информации в каналах передачи данных отличающихся повышенными помехоустойчивостью и защищённостью [73, 83, 93].

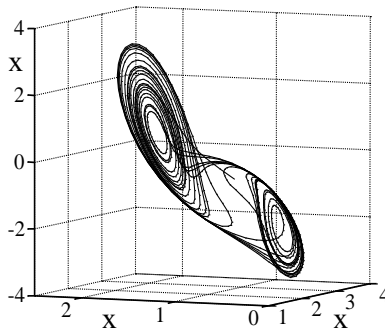


Рис. 9а. Режим хаотических колебаний при  $e = 0,34$  В

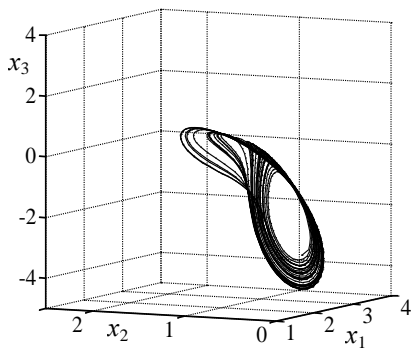


Рис. 9б. Режим хаотических колебаний при  $e = 0,5 В$

Очевидно, что системы с детерминированным выбором вариантов многоальтернативного управления, являясь его простейшей разновидностью, сформировались хронологически первыми и нашли широкое применение на практике.

### 3.2. СИСТЕМЫ СО СЛУЧАЙНЫМ ВЫБОРОМ УПРАВЛЕНИЯ

Существенным недостатком систем с детерминированным выбором управления является их «неприспособленность» к самоорганизации структуры, необходимость в которой возникает при непредвиденных перестройках в объекте, приводящих, например, к изменению его динамического порядка, топологии и знаков причинно-следственных связей. Многообразие таких перестроек может быть настолько большим, что заранее установить детерминированное соответствие некоторого управления каждому из этих состояний становится невозможным. В биологических системах с этой задачей справляется рассмотренный выше процесс гомеостазиса с адаптацией – случайным поиском управления, завершающимся в каждой конкретной ситуации выработкой условного рефлекса.

Техническим прототипом систем со случайным выбором управления является гомеостат У. Эшби [98].

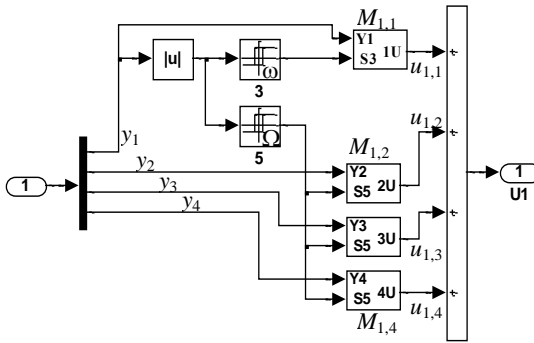


Рис. 10. Структурная схема локальной подсистемы со случайным выбором управления

Пример анализа адаптационных способностей гомеостата с кратковременной памятью приведён в [15] для виртуальной многомерной системы 16-го порядка с четырьмя идентичными локальными подсистемами (рис. 10), на входы которых поступает вектор  $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_4]^T$  состояния объекта, а с выхода снимается управление  $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_4]^T$ .

Подсистема управления содержит четыре стохастических мультипликатора  $M_{i,j}$ ,  $j = 1, \dots, 4$ , каждый из которых в зависимости от текущего состояния объекта относительно областей  $\omega$  и  $\Omega$  (соответственно – малых и больших отклонений:  $\omega \subset \Omega$ ) осуществляет умножение текущего значения регулируемой величины  $y_j(t)$  на случайную величину  $\xi_{i,j}(t)$ , равномерно распределённую на отрезке  $\xi_{i,j}(t) = [-\xi_{i,j,max}, \xi_{i,j,max}]$ :

если  $y_i \in \omega$ , ( $\omega = [-3; 3]$ ), то все мультипликаторы умножают  $y_j(t)$  на некоторые постоянные числа  $\xi_{i,j}$ . В этом режиме состояние объекта близко к заданному, и случайные вариации управления не требуются;

если  $y_i \notin \omega$ , но  $y_i \in \Omega$ , ( $\Omega = [-5; 5]$ ), то мультипликатор  $M_{i,i}$  использует случайные значения  $\xi_{i,i}(t)$ , т.е. в системе дополни-



тельно начинает действовать локальная стохастическая стабилизация по регулируемой величине  $y_i$ ;

если  $y_i \notin \Omega$ , то все мультипликаторы  $M_{i,j}$ ,  $j = 1, \dots, 4$ , участвуют в стохастической стабилизации с использованием полного вектора  $y(t)$ . В этом режиме эффективно используются перекрёстные связи многомерной системы.

В итоге можно записать общее выражение для управления  $u_i(t)$  по полному вектору  $y(t)$ :

$$(17) \quad u_i(t) \Big|_{y_i \notin \Omega} = \sum_{j=1}^4 u_{i,j}(t) \Big|_{y_i \notin \Omega} = \sum_{j=1}^4 y_j(t) \cdot \zeta_{i,j}(t).$$

Как только в результате управления в момент времени  $t_{\Omega,i}$  выполнится условие  $y_i \notin \omega$  и  $y_i \in \Omega$ , генераторы случайных чисел, входящие в мультипликаторы  $M_{i,j}$ ,  $j \neq i$ , отключаются, запоминая на своём выходе значения  $\xi_{i,j}(t_{\Omega,i})$ ,  $j \neq i$ . Аналогичное сохранение значений  $\xi_{i,i}(t_{\omega,i})$  реализуется в моменты  $t_{\omega,i}$  при вхождении регулируемой величины  $y_i$  в область  $\omega$ :  $y_i \in \omega$ . Таким образом, в режимах локальной стабилизации управление имеет вид:

$$(18) \quad \begin{aligned} u_i(t > t_{\Omega,i}) \Big|_{\substack{y_i \notin \omega \\ y_i \in \Omega}} &= y_i(t) \cdot \zeta_{i,i}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_j(t) \cdot \zeta_{i,j}(t_{\Omega,i}); \\ u_i(t > t_{\omega,i}) \Big|_{y_i \in \omega} &= y_i(t) \cdot \zeta_{i,i}(t_{\omega,i}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_j(t) \cdot \zeta_{i,j}(t_{\Omega,i}). \end{aligned}$$

В изложенном алгоритме управления количество  $N$  альтернативных структур определяется выражением

$$N = \sum_{k=0}^4 C_4^k \cdot 2^k = 81$$

и оказалось достаточным для парирования заданного диапазона внешних возмущений и изменений внутренних параметров.

Иллюстрация стабилизирующих свойств многоальтернативного управления приведена на рис. 11 для примера отработки системой ступенчатых возмущающих воздействий  $f = [f_1 \dots f_4]^T$ , поступающих в моменты времени 5, 10, 15 и 20 с соответственно. Реакция неуправляемого объекта на эти возму-

щения приводит к поочерёднему выходу из области  $\Omega$  всех компонент регулируемого вектора  $y$  (рис. 11, маркер 1).

В замкнутой системе наблюдается стабилизация положения равновесия системы в заданных областях  $\Omega = [-5; 5]$  и  $\omega = [-3; 3]$  (рис. 11, маркер 2).

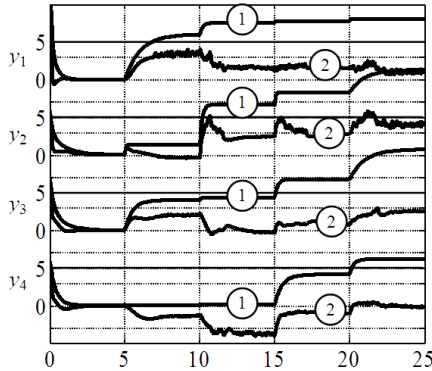


Рис. 11. Иллюстрация стабилизирующих свойств системы со случайным выбором управления

Обратим внимание, что работоспособность системы и реализация в ней адаптивных свойств были обеспечены в наиболее неблагоприятных с кибернетической точки зрения условиях равновероятного выбора альтернативного варианта управления, отсутствия долговременного запоминания найденного варианта и полной неопределённости динамического порядка объекта, его параметров и внутрискруктурных связей. Это обстоятельство подтверждает возникновение робастно-адаптивного поведения систем многоальтернативного управления как их принципиального свойства.

### 3.3. СИСТЕМЫ С СУЩЕСТВЕННО НЕОПРЕДЕЛЁННОЙ СТРАТЕГИЕЙ ВЫБОРА

Приспособительные свойства систем со случайным выбором управления могут быть значительно улучшены, если:

ввести долговременное запоминание соответствия  $s_i$  каждого найденного альтернативного варианта управления  $u_i$  и состояния  $x_i$  объекта,  $x_i \xrightarrow{s_i} u_i$  («накопление адаптаций» [98]);

с помощью установленного множества  $S$  ( $s_i \in S$ ) соответствий случайный равновероятный поиск управления  $u_i$  заменить его выбором по текущему состоянию  $x_i$ .

В качестве примеров систем, обладающими свойствами, наиболее близкими к указанным, можно привести системы с нечётким выбором [22, 38, 79], для которых характерны важные черты многоальтернативного управления:

– многоальтернативность выбора: для каждой значимой текущей ситуации  $x$  устанавливается своё нечёткое правило вывода с соответствующим весом, т.е. способ формирования управления в системе изменяется в соответствии с состоянием объекта;

– многокритериальность выбора: нечёткие решающие правила в состоянии одновременно оперировать несколькими критериями, характеризующими состояние объекта;

– параллельность выбора: принятие решения по каждому правилу нечёткого вывода может осуществляться независимо – параллельно во времени, с последующим объединением частных решений  $u_i$  в результирующее управление.

Использование нечётких решающих правил при выборе альтернативных вариантов является, по-существу, введением в систему памяти  $S$  – накопленного опыта оператора о целесообразном для каждого состояния объекта алгоритма управления, и отвечает требованию долговременного запоминания выбора. Вместе с этим в рамках выбранного варианта управления (текущего решающего правила) могут формироваться внутренние параметры алгоритма с помощью задания функций принадлежности для значений используемых лингвистических переменных, т.е. в системе реализуются два уровня иерархии управления, принципиально необходимые для адаптации [98].

Кроме того, нечёткий подход к анализу альтернатив управления занимает промежуточное положение между полностью

детерминированным и случайным выбором и целесообразен по двум причинам:

– реализация полностью детерминированного выбора управления с ростом количества значимо отличающихся состояний объекта требует соответствующего роста вычислительных ресурсов;

– возникновение состояния объекта, близкого одновременно к нескольким зафиксированным в памяти ситуациям, при нечётком выборе позволяет получить результирующее управление, вес компонент которого будет соответствовать степени близости этого состояния к указанным ситуациям. Эта особенность нечёткого выбора снижает возможность возникновения грубых ошибок управления и в плане биологических аналогий является прообразом предвидения.

Указанные причины дали основание отнести рассматриваемый способ выбора альтернатив к существенно неопределённым стратегиям выбора, характерным для высшей нервной деятельности [38].

Эффективность такой существенно неопределённой стратегии выбора продемонстрирована в [22] на примере управления структурно неустойчивым объектом – обратным маятником с горизонтально перемещаемой опорой. В качестве математической модели маятника использовалась система уравнений

$$(19) \begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} - m_2L(\ddot{\alpha}\cos\alpha - \dot{\alpha}^2\sin\alpha) = F - F_{\text{тр}}, \\ F_{\text{тр}} = \mu[m_1g + m_2\cos\alpha(g \cdot \cos\alpha - \ddot{x}\sin\alpha - \dot{\alpha}^2L)\text{sign}(\dot{x})], \\ -\ddot{x}\cos\alpha + L\ddot{\alpha} - g\sin\alpha = 0; \end{cases}$$

определяющая в качестве регулируемых величин угловое положение  $\alpha(t)$  маятника и координату  $x(t)$  его подвижной опоры, а также общий порядок объекта, равный четырём. (Обозначения:  $m_1, m_2$  – массы опоры и сосредоточенная масса маятника соответственно;  $L$  – длина маятника;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu$  – коэффициент сухого трения опоры;  $F_{\text{тр}}$  – сила сухого трения;  $F$  – внешняя сила, приложенная к подвижной опоре).

Нетривиальной особенностью поставленной задачи стабилизации объекта является наличие всего одного канала управления (сила  $F$ ), в то время как количество регулируемых величин (критериев управления) равно двум:  $\alpha(t)$  и  $x(t)$ .

Эта особенность потребовала привлечения идеи разделения регулирования движений  $\alpha(t)$  и  $x(t)$  во времени (необходимость такого разделения для конечной длительности процесса стабилизации сложной системы обоснована в [98]), в результате чего для решения задачи оказалось достаточным формирование всего десяти решающих правил (альтернатив).

Результаты моделирования процесса стабилизации маятника с одновременным его горизонтальным перемещением по переключающему закону  $x_0$  представлены на рис. 12 для массы маятника  $m_2 = 20 \dots 200$  кг, изменяющейся в 10 раз.

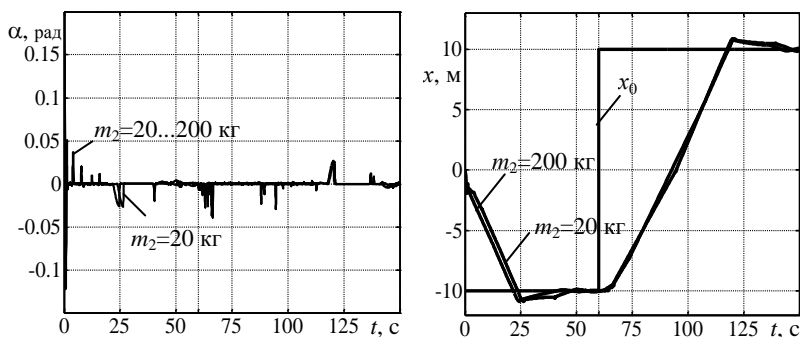


Рис. 12. Стабилизация маятника при возвратно-поступательном перемещении опоры

Анализ рис. 12 указывает на существовании у системы высоких робастных свойств.

Полученный результат потребовал использования полного четырёхмерного вектора состояния объекта:  $\alpha(t)$ ,  $\dot{\alpha}(t)$ ,  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ . Кроме того, проследивая биологические аналогии, отметим, что представленная в примере система не является самообучаемой, т.е. в ней отсутствуют механизмы получения и накопления новых альтернативных вариантов управления.

#### 4. Перспективы развития

На основе проведённого анализа сформулируем основные требования к управляющей части открытых систем:

1) приспособляемость системы к изменениям условий функционирования обеспечивается соответствующими изменениями внутренней структуры и параметров её управляющей части, т.е. её многоальтернативностью;

2) многообразие возможных альтернативных состояний управляющей части открытой системы не должно уступать многообразию условий её функционирования;

3) изменения внутренней структуры и параметров системы обеспечиваются по меньшей мере двумя иерархически связанными видами обратной связи по её состоянию: обратной связью по критическим отклонениям переменных системы, используемой для качественных, как правило, структурных изменений в управлении, и обратной связью, реализующей регулирование и параметрическую настройку при небольших, некритических отклонениях в рамках выбранного варианта управления;

4) выбор альтернативного варианта управления, адекватного текущему состоянию объекта, необходимо предполагает получение полной информации о координатах этого состояния;

5) теоретически предельным по своей эффективности способом выбора альтернативного управления является детерминированная дифференциация всех соответствий «состояние объекта – управление»;

6) многоальтернативность алгоритмов управления подразумевает наличие нескольких каналов управления объектом, число  $k$  которых может превосходить количество  $n$  регулируемых координат. Наличие взаимосвязи между этими каналами определяет возможность заблаговременной реакции управления на возможное предстоящее изменение состояния объекта, т.е. свойство предвидения;

7) в управляемых открытых системах должен быть предусмотрен механизм формирования и сохранения новых альтернатив управления, причём этот механизм целесообразно построить на комбинаторном поиске нового сочетания из имеющегося

многообразия способов (блоков) управления. В общем случае в многоальтернативной системе с памятью следует различать адаптацию как процесс выбора адекватного управления из уже имеющегося множества альтернатив, и адаптацию как обучение – процесс формирования новой альтернативы с последующим её запоминанием.

Общий вид функциональной схемы многоальтернативной системы управления, отвечающей перечисленным требованиям, приведён на рис. 13.

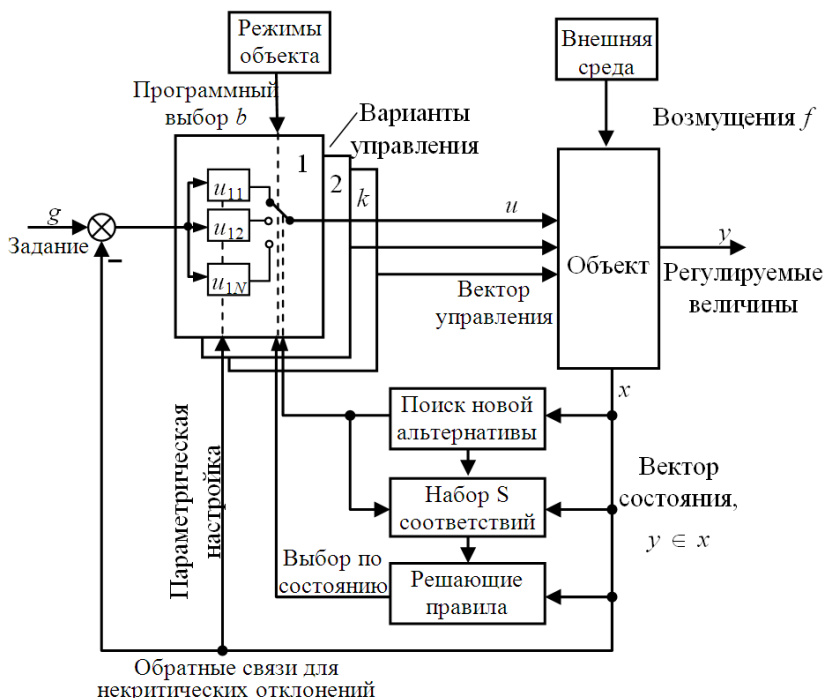


Рис. 13. Функциональная схема системы многоальтернативного управления

Показанные на рис. 13 блок поиска альтернатив, блоки вариантов управления  $u_{iN}$  и соответствий  $s_i \in S$  и блок решающих

правил реализуют процедуры обучения, хранения его результатов и принятия решений соответственно.

Формальное описание системы многоальтернативного управления может быть представлено в виде (20)–(25):

$$(20) \begin{cases} \dot{x} = K(x, t) + N(x, t) \cdot u + F(x, t) \cdot f; \\ y = L(x, t) + S(x, t) \cdot u + H(x, t) \cdot f, \end{cases}$$

$$(21) x_j \xrightarrow{r_{ij}} s_{ij}; \quad r_{ij} \in R; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, N_i},$$

$$(22) x_j \xrightarrow{s_{ij}} u_{ij}; \quad s_{ij} \in S, \text{ или } b_j \xrightarrow{d_{ij}} u_{ij}; \quad d_{ij} \in D,$$

$$(23) u = [u_{ij}(p_{ij}, Q)]; \quad p_{ij} = P_{ij}(x_{ij}),$$

$$(24) q(t) = \text{extr}_\ell q(s_{i, N_i + \ell}); \quad q(t) = q(g(t), x(t)); \quad \ell_i = 1, 2, \dots,$$

$$(25) Q(t) = \text{extr}_{ij} Q(u_{ij}); \quad Q(t) = Q(g(t), x(t)),$$

где (20) – описание объекта управления в пространстве состояний  $x$  с векторами управления  $u$  и возмущения  $f$  с помощью нестационарных матриц  $K, N, F, L, S, H$ ; (21) – процедуры принятия решений (решающие правила)  $r_{ij}$  при выборе необходимого соответствия  $s_{ij}$  между текущим состоянием  $x_j$  объекта и вариантом алгоритма управления  $u_{ij}$ ; (22) – выбор варианта управления  $u_{ij}$  из множества альтернатив  $j = 1, 2, \dots, N_i$  по текущему состоянию  $x_j$ , а также при программном назначении режима  $b_j$  работы системы с помощью функциональных взаимосвязей  $d_{ij} \in D_i$ ; (23) – формирование вектора управления  $u$  в соответствии с выбранной альтернативой  $u_{ij}$ , текущим значением функции цели  $Q(t)$  и параметрами  $p_{ij} = P_{ij}(x_j)$ , настраиваемыми контуром параметрического управления с алгоритмами  $P$ ; (24) – процедуры обучения, обеспечивающие синтез новых взаимосвязей  $s_{i, N_i + \ell}$  по целевому критерию  $q(t)$  обучения; (25) – общая цель управления  $Q(t)$ , достигаемая на множестве альтернатив  $u_{ij}$ .

Обзор указанных функций системы многоальтернативного управления позволяет сделать вывод о ключевой роли процедур поиска новых альтернатив, их запоминания и принятия текущих решений. Эти процедуры составляют существо так называемых интеллектуальных систем управления, определяющих общую



перспективу развития теории автоматического управления [39, 68, 72].

Остановимся на некоторых направлениях реализации этих процедур в открытых многоальтернативных системах.

#### 4.1. АКТИВНЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Биологическим прототипом процедур обучения является процесс нервной деятельности живых организмов, в результате которого формируется набор приобретённых рефлексов, обеспечивающих заблаговременную реакцию – подготовку организма к событию, которое ещё не произошло, но может произойти вследствие сложившейся ситуации [2].

Исключительной особенностью биологических нейросетей являются [2, 31, 40, 47, 85]:

- накопительный характер обучения, позволяющий сохранять без искажений старую информацию в сети;
- избирательный характер дообучения – к имеющемуся отображению внешней среды добавляются только ранее не встречавшиеся ситуации;
- распределённость памяти по значительной части сети, обеспечивающая воспроизводимость всей информации даже при значительных нарушениях в структуре нейросети.

Свойства накопления, избирательности и распределённости памяти являются взаимообусловленными, т.е. составляют, по существу, целевую функцию нейросети как системы, направленной на достижения полезных для организма результатов [2, 77].

Механизмами обучения и запоминания, наиболее близкими к своему биологическому прототипу, обладают искусственные нейронные сети, обладающие способностью к поиску новых альтернатив и сохраняющие многообразие найденных соответствий  $S$  между состоянием и управлением  $x_i \xrightarrow{s_i} u_i$  в виде параметров сети. Однако перечисленные свойства биологических нейронных сетей в известных искусственных сетях в полной мере не достигаются [31, 47, 92].

Наиболее существенные трудности вызывает проблема переобучения сети, заключающаяся в росте её ошибок при предъявлении обучающих ситуаций сверх некоторого, априорно неизвестного достаточного количества. В биологических нейросетях подобное явление не происходит. Это несоответствие привело в настоящее время к незаслуженной практической дискредитации искусственных нейронных сетей и постепенному смещению методов реализации искусственного интеллекта в сторону теории машинного обучения, опирающейся на статистический аппарат принятия решений [104, 108]. Причина этого заключается в неадекватном воспроизведении процессов биологических нейросетей в форме пассивного отражения множества  $S$  «ситуация–управление» с помощью сепарабельных функций, совокупность параметров (весов) которых определяет собою все накопленные в процессе обучения отображения  $S$ .

Современные представления о нервной системе как о структурном ансамбле нервных клеток [2, 41] указывают на необходимость введения в механизм запоминания не только параметрических, но и ступенчатых структурных перестроек более высокого иерархического уровня организации, т.е. реализации концепции многоальтернативного управления на уровне нейросети как подсистемы. При этом критерием перестройки является не минимизация внутрисетевых связей, а степень обеспечения общесистемной цели всего организма [103]. Эта цель достигается за счёт избыточности состава нейросети и организации непрерывной активной перестройки структуры и поиска параметров, обеспечивающих накопление новых соответствий  $s_i$  и одновременно устойчивость (нечувствительность) сети к внешним возмущениям и внутренним изменениям, вызванных процессом накопления.

На рис. 14 [51] показана структура обучения простейшей активной нейронной сети с двумя входами ( $n = 2$ ) и четырьмя нейронами ( $m = 4$ ), содержащей искусственно вводимые возмущения  $\xi_{ij}$ , возбуждающие в системе неравновесное движение, эквивалентное активному поиску оптимального варианта структуры и параметров.

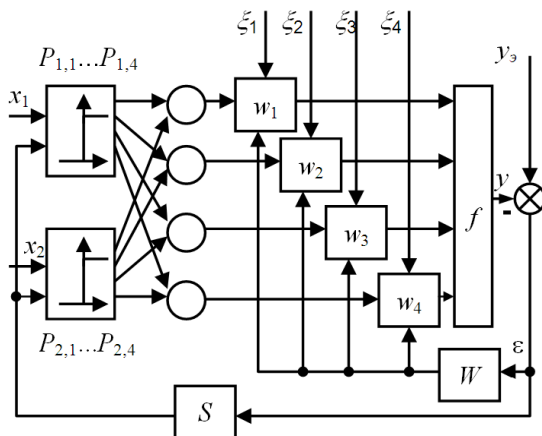


Рис. 14. Структурная схема обучения активной нейросети

При обучении формировались две комбинации сигналов  $(x_{1,1}, x_{2,1})$ ,  $(x_{1,2}, x_{2,2})$  и синхронно с ними – эталонный сигнал  $y_{эт}$ , имеющий два значения  $y_{эт1}$ ,  $y_{эт2}$ , чередующихся с интервалом  $T = 5$  с. Ошибка  $\varepsilon = y_{эт} - y$  использовалась для управления блоками параметрического  $W$  и структурного  $S$  поиска.

Структурная оптимизация в сети заключалась в выборе каналов связи  $P_{1,1}, \dots, P_{1,4}$  и  $P_{2,1}, \dots, P_{2,4}$  входных аргументов  $x_1$  и  $x_2$  с первым слоем сети, а параметрическая – в варьировании весовых коэффициентов  $w_j$ ;  $f$  – логистическая функция активации.

На рис. 15 показаны процессы обучения пассивной и активной сетей.

В активной системе хорошо видны вариации  $\Delta u$ , появляющиеся в результате случайного изменения  $w_j$  под действием возбуждающих сигналов  $\xi_j$ . Время обучения в активной сети по сравнению с пассивной значительно увеличилось – примерно в пять раз – однако анализ результатов обучения, представленный в таблице 1, показывает, что активная сеть в большей мере использует исходное множество структурных связей (6 связей из 8 в активной системе по сравнению с 4 связями из 8 в неактивной) и обеспечивает более равномерное распределение весов в сети.

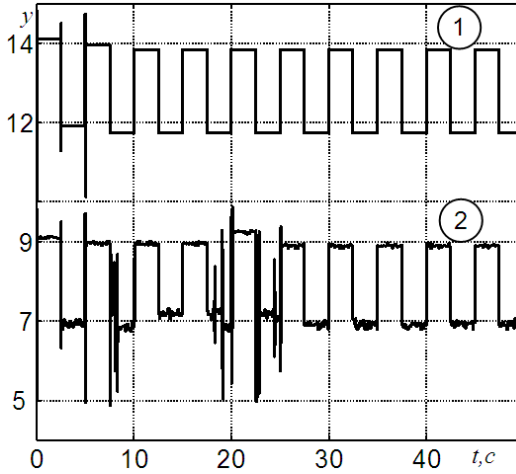


Рис. 15. Процессы обучения пассивной (маркер 1) и активной (маркер 2) нейросетей

Эти отличия хорошо соответствуют избыточности структурных связей и равномерной распределённости возбуждённых нейронов в реальных биологических сетях.

Таблица 1. Структура и весовые коэффициенты обученной нейросети

Тип сети	Каналы воздействия $x_1$				Каналы воздействия $x_2$				Весовые коэффициенты			
	1	2	3	4	1	2	3	4	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$
Пассивная	1	0	1	1	0	0	1	0	0,08	–	0,14	0,07
Активная	1	1	1	1	1	0	0	1	0,07	0,06	0,08	0,11

#### 4.2. САМОИНСТРУКТИРУЮЩИЕ ПРИНЦИПЫ В ОБУЧЕНИИ

Избыточная и, в общем случае, непрерывно растущая размерность активных нейронных сетей приводит к быстрому ухудшению сходимости процедур обучения к глобальному экстремуму – лучшей альтернативной структуре и параметрам нейросети. Опираясь на изложенный выше принцип модульности и селективности при формировании новых альтернатив, можно предположить, что перспективными методами решения этой комбинаторной проблемы являются генетические (или, в широком плане, эволюционные) алгоритмы, основанные не на механизме расщепления родительских признаков, а на матричной репликации (самоинструктировании), при этом в качестве матриц могут выступать уже имеющиеся структурные элементы сети [78].

В качестве примера, иллюстрирующего возможности эволюционных механизмов самоинструктирования, в работе [21] рассмотрено решение тестовой NP-полной квадратичной задачи о назначениях  $ta120a$  размерностью  $N = 20!$  с заранее известной величиной глобального экстремума [114, 115]. Эта задача решалась двумя алгоритмами:

- типовой генетический алгоритм с генной мутацией одной пары генов в популяции из 6000 особей и формированием новой популяции такого же объёма из лучших родителей и мутантов;
- генетический алгоритм с матричной репликацией одной пары генов в 116280 особях и последующим отбором лучшего варианта отдельно в каждой последовательности.

Для сопоставимости результатов численного эксперимента алгоритм без репликации повторялся 40 раз для популяции объёмом 6000 особей, а алгоритм с репликацией осуществил двукратную индивидуальную эволюцию для 116280-ти особей. Результаты решения представлены в таблице 2.

Содержание таблицы 2 подтверждают эффективность и перспективность применения многоальтернативных принципов модульности и селективности в задачах обучения активных нейронных сетей.

Таблица 2. Сравнительные результаты решения задачи *tai20a* различными генетическими алгоритмами

Вариант алгоритма	Количество эволюций, завершившихся формированием глобального экстремума	
	Генные мутации	Генные и хромосомные мутации
Без репликации	1	2
С репликацией	8	11

#### 4.3. АССОЦИАТИВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРЕДВИДЕНИЯ

Многоальтернативное управление по состоянию открывает возможность реализации в открытых системах функции предвидения, основанной в живых организмах на установлении внутренних связей между альтернативами поведения [98]. Установление таких взаимосвязей предполагает:

- участие каждого состояния в нескольких соответствиях  $s_i$

между состоянием и управлением  $x_i \xrightarrow{s_i} u_i$  с различной долей значимости (весомости), т.е. распределённость соответствий;

- параллельность оценивания текущего состояния одновременно по нескольким соответствиям  $s_i$ ;

- существование нескольких каналов воздействия на объект с соответствующими подмножествами  $u_k$  возможных альтернатив управления (см. рис. 13), причём эти подмножества могут быть связаны иерархически.

Способы реализации перечисленных требования в той или иной мере были раскрыты выше и хорошо вписываются в общую концепцию многоальтернативности информационно-управляющих систем. Сюда, в частности, следует отнести возможность и целесообразность использования в многоальтернативных системах активных нейросетей с использованием нечётких, в том числе и динамических связей, дополнительно обеспечивающих требуемую временную последовательность ассоциаций [90].

Формирование временной последовательности решений, осуществляемое на принципах многоальтернативности, одно-временно сопровождается решением задачи достижимости поставленной цели  $H_j$  управления [68]. Можно указать на следующие критические ситуации, возникающие при решении этой задачи:

1. Многообразии  $|U^r|$  вариантов управления  $u_i^r \in U^r$  на текущем уровне  $r$  иерархии системы не обеспечивает требуемую степень достижимости  $F(H_j)_{\text{тр}}$  цели  $H_j$  управления, и осуществляется переход на более высокий,  $(r+1)$ -й альтернативный уровень управления  $U^{r+1}$  ( $u_i^{r+1} \in U^{r+1}$ ), обладающий большими возможностями.

2. Требуемое значение  $F(H_j)_{\text{тр}}$  достижимости цели  $H_j$  управления не может быть реализовано из-за недостаточности имеющихся информационных или энергетических ресурсов системы на всех уровнях её иерархии. В этом случае многоальтернативность управления предусматривает переход к другой цели  $H_k$  управления, достижение которой возможно или вынужденно необходимо:  $F(H_k) \geq F(H_k)_{\text{тр}}$ . Таким образом, в процессе работы системы осуществляется многоальтернативный выбор целей управления, совокупность которых также может иметь иерархическую организацию.

Как уже отмечалось, в целом рассматриваемые проблемы синтеза многоальтернативных систем относятся к общим проблемам построения интеллектуальных систем управления и неразрывно связаны со смежными направлениями в теории этих систем. В этой связи следует упомянуть сравнительно новую – коннективистскую теорию построения интеллектуальных систем [113]. Эта теория известна в большей степени как теория обучения, основанная не на когнитивном накоплении знаний, а на способности установления взаимосвязей между областями знаний, т.е. способности формирования информационной сети с постоянно изменяющимися связями между источниками информации. Не затрагивая здесь весьма злободневную в педагогической среде проблему соотношения когнитивного и коннективистского способов обучения, отметим, что использование

парадигмы коннективизма при реализации активных нейросетей с ассоциативной памятью и предвидением имеет много общего с изложенными здесь идеями многоальтернативности.

## **5. Заключение**

Решение задач управления открытыми системами путём синтеза единых универсальных робастно-адаптивных алгоритмов характеризуется нарастающим противоречием между достигнутыми в этом направлении теоретическими результатами и степенью их реализации на практике.

Обращение к биологическим истокам рассматриваемой проблемы показывает, что многообразие состояний внешней среды привело в процессе эволюции живых организмов к созданию в них соответствующего приспособительного механизма: многоальтернативности функционирования.

Известные примеры реализации этого механизма в системах автоматического управления различного назначения подтверждают его высокую эффективность. В то же время процедуры построения этих систем носят в большинстве случаев эврико-эмпирический, интуитивный характер и не опираются на единую методологическую основу.

Предложенная концепция многоальтернативности как способ понимания механизмов эволюции и адаптации в живых организмах открывает возможность целенаправленного воспроизведения этих механизмов в системах управления динамическими объектами. Эта концепция определяет собою конструктивный принцип «неусложняемой простоты», отвечающий задачам построения современных интеллектуальных систем управления на всех этапах их функционирования – обучения, запоминания и принятия решений.

## ***Литература***

1. АЛЕКСЕЕВ А.С., ДМИТРИЕВ В.Ю., ПОНОМАРЕНКО А.Г. *Эволюция таксономического разнообразия.* – М.: Геос, 2001. – 126 с.



2. АНОХИН П.К. *Системные механизмы высшей нервной деятельности*. – М.: Наука, 1979. – 453 с.
3. БАРАБАНОВ А.В., ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Структурное моделирование непрерывных процессов многоцентральной полимеризации // Системы управления и информационные технологии*. – 2008. – №2.2. – С. 216–218.
4. БЕРНИ Д. *Большая иллюстрированная энциклопедия живой природы* (печатается по изданию: *The Kingfisher Illustrated Nature Encyclopedia, London, 2004*). – М.: Махаон, 2011. – 320 с.
5. БАЖЕНОВ Ю.М. *Технология бетона*. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
6. БЁМЕ Р.Л., ФЛИНТ В.Е. *Пятиязычный словарь названий животных. Птицы. Латинский-русский-английский-немецкий-французский / Под общ. ред. В.Е. Соколова*. – М.: Руссо, Русский язык, 1994. – 845 с.
7. БЕРТАЛАНФИ Л. *Общая теория систем – критический обзор / В кн. «Исследования по общей теории систем» / Под общ. ред. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина*. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
8. БЕСЕКЕРСКИЙ В.А., НЕБЫЛОВ А.В. *Робастные системы автоматического регулирования*. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
9. БОБЦОВ А.А., ХОЛУНИН С.А. *Развитие методов робастного управления в задачах адаптации // Научно-технический вестник СПб ГИТМО. Вып. 6. Информационные, вычислительные и управляющие системы*. – СПб.: ГИТМО, 2002. – С. 223–228.
10. *Большая советская энциклопедия. Том 18 / Под ред. А.М. Прохорова*. – М.: Изд-во Советская энциклопедия, 1974. – 632 с.
11. ВАВИЛОВ Н.И. *Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости*. – Л.: Наука, 1987. – 256 с.
12. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Адаптивные ПИД-регуляторы в системах с запаздыванием // Информационные технологии моделирования и управления*. – 2008. – №6. – С. 653–657.

13. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Хаотические движения в системах низкого порядка* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №6. – С. 104–108.
14. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Управление критическими режимами хаотических систем* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №9. – С. 32–39.
15. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Робастная стабилизация многомерных объектов в системах с переменной структурой* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 24–26.
16. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Многоальтернативное управление в хаотических системах связи* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 155–158.
17. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Исследование критических режимов в системах управления теплообменом* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №12.1. – С. 69–72.
18. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ГОНЧАРОВ А.С., МИРОНОВ С.М. *Частотный синтез следящих систем с переменной структурой* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №4. – С. 52–55.
19. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ГУСЕВ К.Ю. *Модальное управление нестационарными системами* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, №8. – С. 46–54.
20. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ГУСЕВ К.Ю. *Синтез адаптивных наблюдателей с разделением движений* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – №2. – С. 55–58.
21. ВАСИЛЬЕВ Е.М., КРУТСКИХ И.В. *Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, №2. – С. 21–23.
22. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ПРОКОФЬЕВА Д.М. *Нечёткое управление структурно неустойчивыми объектами* // Вестник Во-

- ронезского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №10.1. – С. 8–12.
23. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Синтез адаптивных промышленных регуляторов* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №3. – С. 54–58.
24. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Автоматическая настройка регуляторов алгоритмами экстремального поиска* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №4. – С. 59–62.
25. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Алгоритмы управления тепловлажностной обработкой бетонных изделий* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №2. – С. 13–16.
26. ВИНЕР Н. *Кибернетика, или управление и связь в животном и машине.* – М.: Наука, 1983. – 344 с.
27. ВОРОНОВ К.В., КОРОЛЕВА О.И., НИКИФОРОВ В.О. *Робастное управление нелинейными объектами с функциональными неопределенностями* // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №2. – С. 112–121.
28. ГАЛИМОВ Э.М. *Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции.* – М.: Едиториал УРСС, 2006. – 256 с.
29. ГРИНИН Л.Е., МАРКОВ А.В., КОРОТАЕВ А.В. *Макроэволюция в живой природе и обществе.* – М.: Либроком, 2009. – 248 с.
30. ДЖУРИ Е.Н. *Робастность дискретных систем. Обзор* // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №5. – С. 12–21.
31. ДЛИ М.И., КРУГЛОВ В.В. *Нечёткая логика и искусственные нейронные сети.* – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
32. ДМИТРИЕВ А.С., ПАНАС А.И., СТАРКОВ С.О. *Динамический хаос как парадигма современных систем связи* // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 4–26.
33. ДОРОФЕЕВ В.И., ГУДКОВ В.В., ДОРОФЕЕВ Д.В., ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., МИХАЛЕВ М.В. *Способ управления периодическим процессом полимеризации бутадие-*

- стирольных термоэластопластов* // Патент России № 2188210. – 2002. – Бюл. №5.
34. ДОРОФЕЕВ Д.В., ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Синтез многомерного модального регулятора в АСУТП полимеризации бутадиен-стирольных каучуков* // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2002. – №6. – С. 24–26.
  35. ДРУЖИНИНА М.В., НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу* // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С. 3–33.
  36. ЕМЕЛЬЯНОВ С.В. *Системы автоматического регулирования с переменной структурой*. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
  37. ЖУСУБАЛИЕВ Ж.Т., ТИТОВ В.С. *Бифуркации в широтно-импульсных системах автоматического регулирования*. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2007. – 100 с.
  38. ЗАДЕ Л.А. *Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений*. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
  39. *Интеллектуальные системы автоматического управления* / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
  40. КАЛАН Р. *Основные концепции нейронных сетей*. – М., С-Пб, Киев: Вильямс, 2003. – 287 с.
  41. КАРПЕНКОВ С.Х. *Концепции современного естествознания*. – М.: Академический Проект, 2003. – 640 с.
  42. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Современная прикладная теория управления. Ч.1: оптимизационный подход в теории управления* / А.А. Колесников, А.А. Красовский, В.Н. Буков, А.Р. Гайдук, А.Г. Гельфгат, О.Т. Вавилов, М.Ю. Медведев. По общ. ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
  43. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза*. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
  44. КРАСИЛОВ В.А. *Теория эволюции: необходимость нового синтеза* // Эволюционные исследования. Макроэволюция. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. – С. 4–17.

45. КРАСНОВА С.А. *Каскадный синтез наблюдателей состояния для нелинейных систем при наличии возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3–26.
46. КРАСОВСКИЙ А.А. *Проблемы физической теории управления* // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №11. – С. 3–28.
47. КРУГЛОВ В.В. *Искусственные нейронные сети. Теория и практика*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
48. КРУТОВА И.Н., РУТКОВСКИЙ В.Ю. *Робастность систем управления с нелинейной параметрической коррекцией к некоторым видам возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 1991. – №9. – С. 145–159.
49. КУРДЮКОВ А.П. *Основы робастного управления*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. – 220 с.
50. ЛЁТОВ А.М. *Условно устойчивые регулируемые системы (об одном классе оптимальных регулируемых систем)* // Автоматика и телемеханика. – 1957. – №7. – С. 601–604.
51. МАНУКОВСКАЯ М.М., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Активные нейросетевые модели принятия решений* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №4. – С. 76–78.
52. МЕЙЕН С.В. *Путь к новому синтезу, или куда ведут гомологические ряды?* // Знание – сила. – 1972. – №8. – С. 20–22.
53. *Методы автоматического проектирования нелинейных систем* / Под ред. Ю.И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1993. – 576 с.
54. *Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 5.* / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 784 с.
55. МИРОШНИК И.В., НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
56. МУН Ф. *Хаотические колебания*. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
57. *Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления* / Под ред. Ю. И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1971. – 467 с.

58. НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой* // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №9. – С. 3–22.
59. НИКИФОРОВ В.О. *Робастное управление линейным объектом по выходу* // Автоматика и телемеханика. – 1998. – №9. – С. 87–99.
60. НИКИФОРОВ В.О., СЛИТА О.В., УШАКОВ А.В. *Интеллектуальное управление в условиях неопределенности*. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 226 с.
61. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Адаптация и оптимизация при построении АСУТП с использованием методов имитационного моделирования* // Структурная адаптация сложных систем управления: сб. науч. тр. – Воронеж: Воронежский политехнический институт, 1977. – С. 114–116.
62. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Эволюционные принципы формирования структуры вычислительных систем* // Адаптация в сложных системах управления: сб. науч. тр. – Воронеж: Воронежский политехнический институт, 1979. – С. 60–63.
63. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Моделирование промышленных процессов полимеризации*. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
64. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Эволюционные структуры специального математического обеспечения интегрированных систем моделирования* // В кн. «Проблема оптимального выбора в прикладных задачах». – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1980. – С. 90–139.
65. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Информационно-управляющие системы мониторинга сложных объектов*. – Воронеж: Научная книга, 2010. – 164 с.
66. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Многоальтернативные системы с переменной структурой автоматического управления процессами непрерывной полимеризации* // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – №4.1. – С. 175–179.
67. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Многоальтернативные системы: обзор и классификация* // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №2. – С. 4–13.

68. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ЛЕДЕНЕВА Т.М. *Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 17–23.
69. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Сопряжённые системы и градиент при оптимизации динамических систем* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №12.1. – С. 57–62.
70. ПОЛЯК Б.Т., ЩЕРБАКОВ П.С. *Робастная устойчивость и управление*. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
71. ПОЛЯК Б.Т. *Развитие теории автоматического управления* // Проблемы управления. – 2009. – №3.1. – С. 2–18.
72. ПОСПЕЛОВ Д.А. *Ситуационное управление. Теория и практика*. – М.: Наука, 1986. – 284 с.
73. ПУСТОВОЙТ В.И. *Хаос в некоторых задачах информатики* // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 3.
74. РАТНЕР В.А. *Блочно-модульный принцип организации и эволюции молекулярно-генетических систем управления* // Генетика. – 1992. – №2. – С. 5–23.
75. РАТНЕР В.А. *Молекулярно-генетическая система управления* // Природа. – 2001. – №3. – С. 16–22.
76. РЕДЬКО В.Г. *Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты* // Научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2002»: Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты. – М.: МИФИ, 2003. – С. 8–39.
77. РЕДЬКО В.Г. *Модели адаптивного поведения – естественный подход к развитию информационных технологий* // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2004. – №1. – С. 19–43.
78. РЕДЬКО В.Г. *Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики*. – М.: Либроком, 2013. – 224 с.

79. РУТКОВСКАЯ Д., ПИЛИНСКИЙ М., РУТКОВСКИЙ Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
80. РУТКОВСКИЙ В.Ю., СУХАНОВ В.М., ГЛУМОВ В.М. *Комбинированное релейно-адаптивное управление ориентацией деформируемого космического аппарата // Автоматика и телемеханика*. – 2012. – №12. – С. 124–136.
81. СЕРКОВ В.М., КОРНИЕНКО М.С. *Динамика концентрации ионов натрия и кальция в крови у восьмилнейного терпуга *Hexagrammos octogrammus Pallas (Scorpaeniformes, Hexagrammidae)* при изменении солёности среды // Вопросы ихтиологии*. – 2003. – №1. – С. 139–141.
82. СЕРКОВ В.М., КОРНИЕНКО М.С. *Структурные и функциональные особенности хлоридных клеток жаберного эпителия дальневосточной краснопёрки *Trybolodon brandti* (сем. *Syprinidae*), адаптированных к воде различной солёности // Научные труды I Съезда физиологов стран СНГ*. – М.: Медицина-здоровье, 2005. – С. 97.
83. СКЛЯР Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
84. СЛИНЬКО М.Г. *Основы и принципы математического моделирования каталитических процессов*. – Новосибирск: Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 2004. – 488 с.
85. ТКАЛИЧ С.А., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования // Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2008. – №2. – С. 37–38.
86. ТУРЧИН В.Ф. *Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции*. – М.: ЭТС, 2000. – 368 с.
87. УТКИН В.И. *Скольльзящие режимы и их применение в системах с переменной структурой*. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
88. УТКИН В.И. *Условно устойчивая система с переменной структурой в работе А.М. Лётова // Автоматика и телемеханика*. – 2011. – №11. – С. 140–142.



89. ФОМИН В.Н., ФРАДКОВ А.Л., ЯКУБОВИЧ В.А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
90. ХАЙКИН С. *Нейронные сети: полный курс*. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
91. ЦЫКУНОВ А.М. *Робастное управление нестационарными объектами* // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С. 117–125.
92. ЧЕРНОДУБ А.Н., ДЗЮБА Д.А. *Обзор методов нейроуправления* // Проблемы программирования. – 2011. – №2. – С. 79–94.
93. ШАЛФЕЕВ В.Д., ОСИПОВ Г.В., КОЗЛОВ А.К., ВОЛКОВСКИЙ А.Р. *Хаотические колебания – генерация, синхронизация, управление* // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 27–49.
94. ШЕННОН К. *Работы по теории информации и кибернетике*. – М.: Изд. иностр. лит., 1963. – 829 с.
95. ЭБЕЛИНГ В., ЭНГЕЛЬ А., ФАЙСТЕЛЬ Р. *Физика процессов эволюции. Синергетический подход*. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 328 с.
96. ЭЙГЕН М. *Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул*. – М.: Мир, 1973. – 224 с.
97. ЭЙГЕН М., ВИНКЛЕР Р. *Игра жизни*. – М.: Наука, 1979. – 99 с.
98. ЭШБИ У.Р. *Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения*. – М.: Изд. иностр. лит., 1962. – 397 с.
99. ЭШБИ У.Р. *Введение в кибернетику*. – М.: КомКнига, 2005. – 432 с.
100. ЯДЫКИН И.Б., ШУМСКИЙ В.М., ОВСЕПЯН Ф.А. *Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами*. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
101. ВЕНЕ М.Д. *Darwin's Black Box* // The Biochemical Challenge to Evolution. – N.Y.: Simon & Shuster, 1998. – 307 p.
102. СОРЕ E.D. *The primary factors of organic evolution*. – Chicago: The Open Court Publishing Company, 1904. – 547 p.

103. FURMAN M., WANG X.-J. *Similarity Effect and Optimal Control of Multiple-Choice Decision Making* // *Neuron*. – 2008. – №6. – P. 1153–1168.
104. HASTIE T., TIBSHIRANI R., FRIEDMAN J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.
105. HSU L., COSTA R.R. *Bursting phenomena in continuous-time adaptive systems with a  $\sigma$ -modification* // *Automatica*. – 1998. – №1. – P. 429–435.
106. IOANNOU P.A., KOKOTOVIĆ P.V. *Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control* // *Automatica*. – 1984. – №5. – P. 583–594.
107. JACOBS G.H., NATHANS J. *The Evolution of Primate Color Vision* // *Scientific American*. – 2009. – April. – P. 32–39.
108. JAVIER ARTURO CABALLERO OLVERA *Multi-alternative sequential analysis as a realistic model of biological decision-making*. PhD thesis. – University of Sheffield, 2012. – 129 p.
109. KANELLAKOPOULOS I., KOKOTOVIĆ P.V., MORSE A.S. *A toolkit for nonlinear feedback design* // *System and Control Letters*. – 1992. – Vol. 18. – P. 83–92.
110. LION P.M. *Rapid identification of linear and nonlinear systems* // *AAIAA*. – 1967. – №5. – P. 1835–1842.
111. RÖSSLER O.E. *Chemical turbulence: chaos in a small reaction-diffusion system* // *Z. Naturforsch.* – 1976. – 31a. – P. 1168–1172.
112. SAGAN C. *Die Drachen von Eden. Das Wunder der menschlichen Intelligenz*. – München; Zürich: Droemer Knauer, 1978 (Original 1977). – 271 s.
113. SIEMENS G. *Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age* // *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*. – 2005. – №1. – P. 3–10.
114. TAILLARD E.D. *Robust tabu search for the quadratic assignment problem* // *Parallel Computing*. – 1991. – №17. – P. 443–455.
115. TAILLARD E.D. *Comparison of iterative searches for the quadratic assignment problem* // *Location Science*. – 1995. – №3. – P. 87–105.

116. YAO B., TOMIZUKA M. *Adaptive robust control of SISO nonlinear system in a semi-strict feedback form* // Automatica. – 1997. – №5. – P. 893–900.

## **A MULTI-ALTERNATIVE APPROACH TO CONTROL IN OPEN SYSTEMS: ORIGINS, CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS**

**Semen Podvalny**, Voronezh State Technical University, Voronezh, Doctor of Science, professor (spodvalny@yandex.ru).

**Eugeny Vasiljev**, Voronezh State Technical University, Voronezh, Cand.Sc., assistant professor (vgtu-aits@yandex.ru).

*Abstract: The paper addresses biological origins, the present state and future prospects of a multi-alternative approach to the problem of automatic control in dynamical systems. We show that this approach meets the famous Law of Requisite Variety by Ashby and generalizes natural evolutionary mechanisms of open biological systems supporting their high level of adaptation to environment changes. We provide several examples of multi-alternative control in technical systems. These examples show increase in robustness and efficiency in accordance with predictions of biological analogy. We formulate the general functional scheme of a multi-alternative control system, build its mathematical model and analyze the prospects of their extension in the context of intellectual control systems.*

**Keywords:** multi-alternative control systems, intellectual control, adaptive behavior.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым*

*Поступила в редакцию 23.05.2013.  
Опубликована 31.03.2014.*

УДК 519.71

ББК 32.817

## **СВЯЗЬ АРИФМЕТИКИ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ С АРИФМЕТИКОЙ КВАТЕРНИОНОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**Усков А. А.<sup>1</sup>, Киселев И. А.<sup>2</sup>**

*(Российский университет кооперации,  
г. Мытищи, Московской области)*

*Впервые сформулированы и доказаны утверждения, показывающие, что при выполнении определенных условий арифметические операции над нечеткими числами LR-типа и кватернионами эквивалентны. Приведенные в статье утверждения дают возможность использовать наглядное графическое представление арифметических операций над нечеткими числами в виде векторных диаграмм и годографов, кроме того, в ряде случаев позволяют упростить программную реализацию указанных арифметических операций. Рассмотрен пример анализа системы управления в условиях нечеткости с использованием предлагаемого подхода. Статья продолжает опубликованные ранее результаты, касающиеся связи между арифметическими операциями над нечеткими числами LR-типа и комплексными числами.*

Ключевые слова: арифметические операции, кватернионы, матрицы, нечеткие числа.

### **1. Введение**

Нечеткие числа LR-типа широко используются в практике нечеткого моделирования, позволяя уменьшить трудоемкость

---

<sup>1</sup> Андрей Александрович Усков, доктор технических наук, профессор (andrey@uskov.net, www.uskov.net).

<sup>2</sup> Игорь Александрович Киселев, аспирант.

выполнения арифметических и логических операций [1, 5, 10–12].

В работе авторов [6] показана связь между арифметическими операциями над симметричными нечеткими числами LR-типа и комплексными числами. В ней же приведен краткий обзор и проведена систематизация научных работ, относящихся к области применения нечетких чисел.

В настоящей статье результаты работы [6] распространены на случай несимметричных нечетких чисел, в частности показана связь между арифметическими операциями над нечеткими числами и кватернионами, которые являются обобщением комплексных чисел.

Нечеткие числа – нечеткие переменные, определенные на числовой оси. Нечеткое число определяется как нечеткое множество  $A$  на множестве действительных чисел  $R$  с функцией принадлежности  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ , где  $x$  – действительное число, т.е.  $x \in R$  [1, 5].

Нечеткие числа LR-типа – это разновидность нечетких чисел специального вида, задаваемых по определенным правилам [1, 5]. Нечеткие числа LR-типа были предложены в работах [8–11] с целью уменьшения трудоемкости выполнения арифметических и логических операций над нечеткими числами путем аппроксимации функций принадлежности типовыми нелинейными функциями, задаваемыми своими параметрами (LR-аппроксимация). В работах [8–11] приводятся классический вариант арифметических операций над нечеткими числами LR-типа, а также примеры решения уравнений и неравенств с данными нечеткими числами.

Функции принадлежности нечетких чисел LR-типа задаются с помощью невозрастающих на  $[0, +\infty)$  четных неотрицательных действительных функций действительного аргумента  $L(x)$  и  $R(x)$ , удовлетворяющих свойствам: а)  $L(-x) = L(x)$ ,  $R(-x) = R(x)$ ; б)  $L(0) = R(0) = 1$ .

Пусть  $L(x)$  и  $R(x)$  – функции LR-типа. Унимодальное нечеткое число  $A$  с модой  $a$  (т.е.  $\mu_A(a) = 1$ ) с помощью  $L(x)$  и  $R(x)$  задается следующим образом:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) & \text{при } x \leq a, \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right) & \text{при } x > a; \end{cases}$$

где  $a$  – мода;  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  – левый и правый коэффициенты нечеткости.

Таким образом, при заданных  $L(x)$  и  $R(x)$  нечеткое число LR-типа определяется тройкой  $(a, \alpha, \beta)$ .

Нечеткое число LR-типа будем называть симметричным, если левый и правый коэффициенты нечеткости равны, т.е.  $\alpha = \beta$ .

Предположим, имеются нечеткие числа LR-типа:

$$\tilde{a} = (m, \alpha, \beta)_{LR} \text{ и } \tilde{b} = (n, \gamma, \delta)_{LR}$$

Арифметические операции над нечеткими LR-числами определяются следующим образом [1, 6]:

сложение

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} + (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m+n, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR},$$

умножение

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \cdot (n, \gamma, \delta)_{LR} = (mn, \alpha n + \gamma m, \beta n + \delta m)_{LR},$$

$$m > 0, n > 0,$$

противоположный элемент

$$-(m, \alpha, \beta)_{LR} = (-m, \beta, \alpha)_{LR},$$

обратный элемент

$$(m, \alpha, \beta)_{LR}^{-1} = \left( \frac{1}{m}, \frac{\beta}{m^2}, \frac{\alpha}{m^2} \right)_{LR}, \quad m > 0,$$

В статье впервые сформулированы и доказаны утверждения, показывающие эквивалентность при выполнении определенных условий арифметических операций над нечеткими числами LR-типа и кватернионами, а также соответствующими им матрицами.

## 2. Арифметические операции над нечеткими числами и кватернионами

Приведем утверждение, определяющее связь между арифметическими операциями над нечеткими числами LR-типа и кватернионами.

Утверждение 1. Введем в рассмотрение преобразование, ставящее в однозначное соответствие произвольное нечеткое число LR-типа  $\tilde{\mathbf{x}} = (y, z_1, z_2)_{LR}$  и кватернион  $\mathbf{x} = y + z_1i + z_2j + \xi k$ , где  $\xi$  – произвольный параметр, удовлетворяющий условию  $\xi > 0$ ,  $\xi \ll z_1$ ,  $\xi \ll z_2$ . Таким образом,  $\tilde{\mathbf{x}} \sim \mathbf{x}$ .

Пусть далее имеются нечеткие числа LR-типа  $\tilde{\mathbf{a}} = (m, \alpha, \beta)_{LR}$  и  $\tilde{\mathbf{b}} = (n, \gamma, \delta)_{LR}$ . Сопоставим им кватернионы:

$$\tilde{\mathbf{a}} \sim \mathbf{a} = m + \alpha i + \beta j + \xi k \quad \text{и} \quad \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{b} = n + \gamma i + \delta j + \xi k,$$

где  $\xi$  – произвольный параметр, удовлетворяющий условию  $\xi > 0$ ,  $\xi \ll \alpha, \beta, \gamma, \delta$ .

Тогда при выполнении условий  $m \gg \alpha, \beta, \gamma, \delta$  и  $n \gg \alpha, \beta, \gamma, \delta$  арифметические операции над нечеткими числами  $\tilde{\mathbf{a}}$  и  $\tilde{\mathbf{b}}$  соответствуют операциям над кватернионами:

$$(1) \quad \tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{a} + \mathbf{b},$$

$$(2) \quad \tilde{\mathbf{a}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{a} \cdot \mathbf{b},$$

$$(3) \quad -\tilde{\mathbf{a}} \sim -\bar{\mathbf{a}}^R,$$

$$(4) \quad \tilde{\mathbf{a}}^{-1} \sim \left[ \bar{\mathbf{a}}^{-1} \right]^R,$$

где  $\bar{\mathbf{a}} = m - \alpha i - \beta j - \xi k$  – сопряженный по отношению к кватерниону  $\mathbf{a}$ ; значком  $R$  отмечена введенная операция *рокировки*, осуществляемая следующим образом:

$\mathbf{x}^R = y + z_2i + z_1j + \xi k$ , т.е.  $i$ -й и  $j$ -й компоненты кватерниона меняются местами.

*Замечание 1.* Выше была введена новая операция над кватернионами, состоящая в замене местами  $i$ -й и  $j$ -й компонент – рокировка. Если нечеткие числа симметричны, т.е.  $z_1 = z_2$ ,  $\alpha = \beta$ ,  $\gamma = \delta$ , то  $i$ -й и  $j$ -й компоненты соответствующих им кватернионов будут одинаковы и рокировка не будет изменять исходный кватернион, вследствие чего формулы (1)–(4) можно

записать без значка рокировки, при этом они в точности будут совпадать с формулами, приведенными в работе [6] (разница лишь в том, что  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  в формулах (1)–(4) – кватернион, в статье [6] – комплексные числа).

Таким образом, приведенное утверждение включает результаты работы [6] как частный случай для симметричных нечетких чисел.

*Замечание 2.* На первый взгляд может показаться, что в данном случае достаточно использовать не кватернионы, а гиперкомплексные числа с двумя мнимыми компонентами – *триплеты* [2, 4]. Однако для таких гиперкомплексных чисел не всегда определена операция нахождения обратного элемента, в то время как на множестве кватернионов обратный элемент всегда существует [2, 4].

*Доказательство.*

Сравним результаты арифметических операций над нечеткими числами  $\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}}$  и их изображениями в виде кватернионов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ .

Сложение:

$$\tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}} = (m + n, \alpha + \gamma, \beta + \delta)_{LR},$$

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = (m + n) + (\alpha + \gamma)i + (\beta + \delta)j + 2\xi k.$$

С учетом произвольности выбора параметра при компоненте  $k$  получаем  $\tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{a} + \mathbf{b}$ .

Умножение:

$$\tilde{\mathbf{a}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} = (mn, \alpha n + \gamma m, \beta n + \delta m)_{LR},$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = (mn - \alpha\gamma - \beta\delta - \xi^2) + (\alpha n + \gamma m + \beta\xi - \xi\delta)i + (\beta n + \delta m - \alpha\xi - \xi\gamma)j + (m\xi + \xi n + \alpha\delta - \xi\gamma)k.$$

С учетом того, что  $m \gg \alpha, \beta, \gamma, \delta, n \gg \alpha, \beta, \gamma, \delta, \xi \ll \alpha, \beta, \gamma, \delta$ , следует

$$mn \gg \alpha\gamma + \beta\delta,$$

$$mn \gg \xi^2,$$

$$\alpha n + \gamma m \gg \xi(\beta - \delta),$$

$$\beta n + \delta m \gg \xi(\alpha + \gamma),$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \approx mn + (m\gamma + \alpha n)i + (m\delta + \beta n)j + (m\xi + \xi n + \alpha\delta - \xi\gamma)k.$$



С учетом произвольности выбора параметра при компоненте  $k$  получим  $\tilde{\mathbf{a}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ .

Противоположный элемент:

$$\begin{aligned} -\tilde{\mathbf{a}} &= (-m, \beta, \alpha)_{LR}, \\ -\tilde{\mathbf{a}}^R &= -m + \beta i + \alpha j + \xi k. \end{aligned}$$

Таким образом

$$-\tilde{\mathbf{a}} \sim -\tilde{\mathbf{a}}^R.$$

Обратный элемент:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{a}}^{-1} &= \left( \frac{1}{m}, \frac{\beta}{m^2}, \frac{\alpha}{m^2} \right)_{LR}, \quad m > 0, \\ [\tilde{\mathbf{a}}^{-1}]^R &= \frac{m + \beta i + \alpha j + \xi k}{m^2 + \alpha^2 + \beta^2 + \xi^2}. \end{aligned}$$

Используя условия  $m \gg \alpha, \beta$  и  $\xi \ll \alpha, \beta$ , получим

$$[\tilde{\mathbf{a}}^{-1}]^R \approx \frac{1}{m} + \frac{\beta}{m^2} i + \frac{\alpha}{m^2} j + \frac{\xi}{m^2} k.$$

С учетом произвольности выбора параметра при компоненте  $k$  имеем:  $\tilde{\mathbf{a}}^{-1} \sim [\tilde{\mathbf{a}}^{-1}]^R$ . Утверждение доказано. ■

Рассмотрим прямоугольную систему координат в трехмерном пространстве с координатными осями  $+1, i$  и  $j$ . Будем изображать кватернионы в виде векторов со следующими компонентами: действительная часть кватерниона – проекция на ось  $+1$ , параметр при  $i$  – проекция на ось  $i$  и параметр при  $j$  – проекция на ось  $j$ . В соответствии с утверждением 1, в данной системе координат в виде векторов можно изображать и нечеткие числа.

*Замечание 3.* Рассматриваемая система координат является естественным обобщением комплексной плоскости, получена путем добавления к последней оси  $j$  и отличается от традиционно используемой для изображения векторных кватернионов системы координат с осями  $i, j$  и  $k$  [4].

На рис. 1 представлена графическая иллюстрация выполнения арифметических операций сложения трех нечетких чисел:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{a}} &= (30, 2, 3)_{LR} \sim \mathbf{a} = 30 + 2i + 3j + \xi, \\ \tilde{\mathbf{b}} &= (25, 1, 2)_{LR} \sim \mathbf{b} = 25 + i + 2j + \xi, \\ \tilde{\mathbf{c}} &= (20, 1, 1)_{LR} \sim \mathbf{c} = 20 + i + j + \xi, \end{aligned}$$

$$\tilde{\mathbf{d}} = \tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}} + \tilde{\mathbf{c}} = (75, 4, 6)_{LR} \sim \mathbf{d} = 75 + 4i + 6j + 3\xi.$$

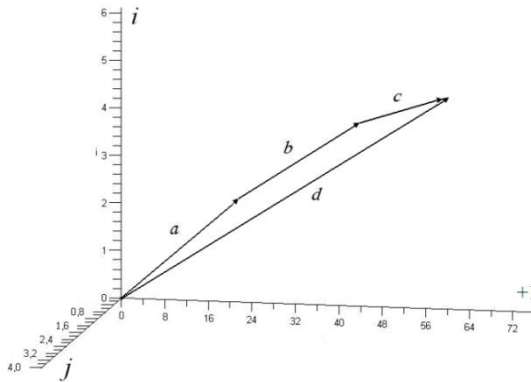


Рис. 1. Графическая иллюстрация операции сложения нечетких чисел

### 3. Матричный метод выполнения арифметических операций над нечеткими числами

Приведем утверждение, определяющую связь между арифметическими операциями над нечеткими числами LR-типа и матрицами.

Утверждение 2. Введем в рассмотрение преобразование, ставящее в однозначное соответствие произвольное нечеткое число LR-типа  $\tilde{\mathbf{x}} = (y, z_1, z_2)_{LR}$  и матрицу

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} y & z_1 & z_2 & -\xi \\ -z_1 & y & -\xi & -z_2 \\ -z_2 & \xi & y & z_1 \\ \xi & z_2 & -z_1 & y \end{bmatrix},$$

где  $\xi$  – произвольный параметр, удовлетворяющий условию  $\xi > 0, \xi \ll z_1, \xi \ll z_2$ .

Таким образом,  $\tilde{\mathbf{x}} \sim \mathbf{X}$ .

Пусть далее имеются нечеткие числа LR-типа  $\tilde{\mathbf{a}} = (m, \alpha, \beta)_{LR}$  и  $\tilde{\mathbf{b}} = (n, \gamma, \delta)_{LR}$ . Сопоставим им матрицы:

$$\tilde{\mathbf{a}} \sim \mathbf{A} = \begin{bmatrix} m & \alpha & \beta & -\xi \\ -\alpha & m & -\xi & -\beta \\ -\beta & \xi & m & \alpha \\ \xi & \beta & -\alpha & m \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{B} = \begin{bmatrix} n & \gamma & \delta & -\xi \\ -\gamma & n & -\xi & -\delta \\ -\delta & \xi & n & \gamma \\ \xi & \delta & -\gamma & n \end{bmatrix},$$

где  $\xi$  – произвольный параметр, удовлетворяющий условию  $\xi > 0$ ,  $\xi \ll \alpha, \beta, \gamma, \delta$ .

Тогда при выполнении условий  $m \gg \alpha, \beta, \gamma, \delta$ ,  $n \gg \alpha, \beta, \gamma, \delta$ , арифметические операции «сложение» и «умножение» над нечеткими числами  $\tilde{\mathbf{a}}$  и  $\tilde{\mathbf{b}}$  соответствуют операциям над матрицами:  $\tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{A} + \mathbf{B}$ ,  $\tilde{\mathbf{a}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} \sim \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ .

Доказательство утверждения 2 основано на изоморфизме кватернионов  $\mathbf{x} = y + z_1i + z_2j + \xi k$  и матриц вида

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} y & z_1 & z_2 & -\xi \\ -z_1 & y & -\xi & -z_2 \\ -z_2 & \xi & y & z_1 \\ \xi & z_2 & -z_1 & y \end{bmatrix}$$

[2, 9], а также эквивалентности арифметических операций над нечеткими числами и кватернионами (см. утверждение 1).

Приведенные утверждения дают возможность использовать наглядное графическое представление арифметических операций над нечеткими числами в виде векторных диаграмм и графов. Кроме того, в ряде случаев, позволяют упростить программную реализацию указанных арифметических операций. Такое упрощение связано с тем, что распространенные табличные процессоры и системы компьютерной математики (MS Excel, MATLAB, MathCAD, Maple и др.) имеют встроенные функции для реализации операций над матрицами и даже кватернионами (например, надстройка Quaternions for Maple), в то же время не имеют средств работы с нечеткими числами LR-типа.

#### 4. Пример анализа системы управления

Рассмотрим разомкнутую систему автоматического управления со структурой, приведенной на рис. 2.

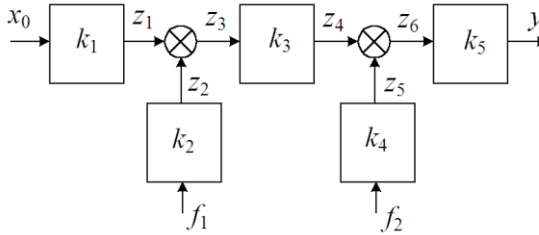


Рис. 2. Структурная схема разомкнутой системы управления

Предположим, что входной сигнал  $x_0$ , возмущающие воздействия  $f_1, f_2$  и коэффициенты передачи  $k_1 - k_5$  заданы нечеткими числами LR-типа:  $\tilde{x} = (100, 0, 0)_{LR}$ ,  $\tilde{f}_1 = (20; 0,3; 0,1)_{LR}$ ,  $\tilde{f}_2 = (100, 1, 3)_{LR}$ ,  $\tilde{k}_1 = (10; 0,1; 0,2)_{LR}$ ,  $\tilde{k}_2 = (10, 0, 0)_{LR}$ ,  $\tilde{k}_3 = (15, 0, 0)_{LR}$ ,  $\tilde{k}_4 = (10; 1; 0,5)_{LR}$ ,  $\tilde{k}_5 = (1; 0,1; 0,3)_{LR}$ .

Требуется определить выходной сигнал системы  $y$ .

Согласно структурной схеме (см. рис. 2) выходной сигнал системы определяется формулой

$$(5) \quad \tilde{y} = \tilde{k}_5(\tilde{k}_4\tilde{f}_2 + \tilde{k}_3(\tilde{k}_1\tilde{x}_0 + \tilde{k}_2\tilde{f}_1)).$$

На основе утверждения 2 перепишем формулу (5) в следующем виде:

$$(6) \quad \mathbf{Y} = \mathbf{K}_5(\mathbf{K}_4\mathbf{F}_2 + \mathbf{K}_3(\mathbf{K}_1\mathbf{X}_0 + \mathbf{K}_2\mathbf{F}_1)),$$

где  $\tilde{y} \sim \mathbf{Y}$ .

$$\tilde{x}_0 \sim \mathbf{X}_0 = \begin{pmatrix} 100 & 0 & 0 & -\xi \\ 0 & 100 & -\xi & 0 \\ 0 & \xi & 100 & 0 \\ \xi & 0 & 0 & 100 \end{pmatrix}, \quad \tilde{k}_1 \sim \mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} 10 & 0,1 & 0,2 & -\xi \\ -0,1 & 10 & -\xi & -0,2 \\ -0,2 & \xi & 10 & 0,1 \\ \xi & 0,2 & -0,1 & 10 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{k}_2 \sim \mathbf{K}_2 = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & -\xi \\ 0 & 10 & -\xi & 0 \\ 0 & \xi & 10 & 0 \\ \xi & 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}, \quad \tilde{k}_3 \sim \mathbf{K}_3 = \begin{pmatrix} 15 & 0 & 0 & -\xi \\ 0 & 15 & -\xi & 0 \\ 0 & \xi & 15 & 0 \\ \xi & 0 & 0 & 15 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{k}_4 \sim \mathbf{K}_4 = \begin{pmatrix} 10 & 1 & 0,5 & -\xi \\ -1 & 10 & -\xi & -0,5 \\ -0,5 & \xi & 10 & 1 \\ \xi & 0,5 & -1 & 10 \end{pmatrix}, \quad \tilde{k}_5 \sim \mathbf{K}_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0,1 & 0,3 & -\xi \\ -0,1 & 1 & -\xi & -0,3 \\ -0,3 & \xi & 1 & 0,1 \\ \xi & 0,3 & -0,1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{f}_1 \sim \mathbf{F}_1 = \begin{pmatrix} 20 & 0,3 & 0,1 & -\xi \\ -0,3 & 20 & -\xi & -0,1 \\ -0,1 & \xi & 20 & 0,3 \\ \xi & 0,1 & -0,3 & 20 \end{pmatrix}, \quad \tilde{f}_2 \sim \mathbf{F}_2 = \begin{pmatrix} 100 & 1 & 3 & -\xi \\ -1 & 100 & -\xi & -3 \\ -3 & \xi & 100 & 1 \\ \xi & 3 & -1 & 100 \end{pmatrix}.$$

Выберем малый параметр  $\xi = 0,0001$ .

Вычисления с использованием формулы (6) дают

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} 1,885 \cdot 10^4 & 2,206 \cdot 10^3 & 6,094 \cdot 10^3 & 47,258 \\ -2,206 \cdot 10^3 & 1,885 \cdot 10^4 & 47,258 & -6,094 \cdot 10^3 \\ -6,094 \cdot 10^3 & -47,258 & 1,885 \cdot 10^4 & 2,206 \cdot 10^3 \\ -47,258 & 6,094 \cdot 10^3 & -2,206 \cdot 10^3 & 1,885 \cdot 10^4 \end{pmatrix}.$$

Перейдя от матрицы  $\mathbf{Y}$  к нечеткому числу  $\tilde{y}$ , получим

$$\tilde{y} = (1,885 \cdot 10^4, 2,206 \cdot 10^3, 6,094 \cdot 10^3)_{LR}.$$

## 5. Выводы

В статье впервые предложены утверждения, позволяющие сводить арифметические операции над нечеткими числами LR-типа к арифметическим операциям над кватернионами или матрицами, что дает возможность:

1) использовать наглядное графическое представление арифметических операций над нечеткими числами LR-типа в виде векторных диаграмм и годографов;

2) в ряде случаев, упростить программную реализацию арифметических операций над нечеткими числами LR-типа;

3) переходить в формулах от матриц с элементами в виде нечетких чисел LR-типа к матрицам большей размерности с элементами в виде действительных чисел.

## Литература

1. АЛТУНИН А.Е., СЕМУХИН М.В. *Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях*. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
2. БАЛК М.Б., БАЛК Г.Д. *Реальные применения мнимых чисел*. – Киев: Радянська школа, 1988. – 255 с.

3. БРОНШТЕЙН И.Н., СЕМЕНДЯЕВ К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.* – М.: Наука, 1986. – 544 с.
4. КАНТОР И.Л., СОЛОДОВНИКОВ А.С. *Гиперкомплексные числа.* – М.: Наука, 1973. – 144 с.
5. *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта* / Под ред. Д.А. Пospelова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
6. УСКОВ А.А., КИСЕЛЕВ И.А. *Комплексный и матричный методы выполнения арифметических операций над нечеткими числами* // Управление большими системами. Вып. 40. – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 96–107.
7. УСКОВ А.А., СУРГУЧЕВА И.В., ГОРБУНОВ А.М. *Анализ систем обработки информации и управления с помощью групповых нечетких чисел* // Программные продукты и системы. – 2009. – №3. – С. 19–21.
8. УСКОВ А.А., КИСЕЛЕВ И.А. *Комплексный метод выполнения арифметических операций над нечеткими числами и его применение при экономическом анализе в условиях неопределенности* // Программные продукты и системы. – 2013. – №2. – С. 175–178.
9. ЧЕЛНОКОВ Ю.Н. *Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения.* – М.: Физматлит, 2006. – 512 с.
10. DUBOIS D., PRADE H. *Fuzzy real algebra: some results* // Fuzzy Sets and Systems. – 1979. – Vol. 2, №4. – P. 327–348.
11. DUBOIS D., PRADE H. *Systems of linear fuzzy constraints* // Fuzzy Sets and Systems. – 1980. – Vol. 3, №1. – P. 37–48.
12. DUBOIS D., PRADE H. *Fuzzy sets and systems: Theory and Applications.* – New York: Acad. Press, 1980. – 394 p.

## COMPARING FUZZY ARITHMETIC WITH QUATERNION ARITHMETIC AND APPLYING THE FORMER TO CONTROL SYSTEM ANALYSIS

**Andrey Uskov**, Russian University of Cooperation, Moscow, Doctor of Science, professor.

**Igor Kiselev**, Russian University of Cooperation, Moscow, Post-graduate student.

*Abstract: We prove equivalence conditions for arithmetical operations with LR-type fuzzy numbers and for those with quaternions. Our results justify using graphical tools like vector and hodograph diagrams to visualize arithmetical operations. In some cases this equivalence also simplifies algorithms which implement arithmetic operations. We illustrate our approach with the analysis of a control system under fuzzy uncertainty. This paper extends our recent results on comparing arithmetical operations with LR-type fuzzy numbers and those with complex numbers.*

Keywords: arithmetic operations, quaternions, matrices, fuzzy numbers.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко*

*Поступила в редакцию 07.12.2012.  
Опубликована 31.03.2014.*

УДК 004.75  
ББК 32.973.202

## **ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОГО КРИТЕРИЯ**

**Козлов С. В.<sup>1</sup>, Остриков Ю. П.<sup>2</sup>, Суханов А. Л.<sup>3</sup>**

*(Академия Федеральной службы охраны  
Российской Федерации, Орел)*

*В статье рассматривается модель оптимального распределения ресурсов в распределенной системе обработки информации на основе двухуровневого векторного критерия оптимизации.*

Ключевые слова: модель «ресурс–потребитель», векторная оптимизация, суперконкурентное распределение ресурса, лексикографический максимин.

### **1. Введение**

Одним из направлений развития распределенных систем обработки информации (РСОИ) является совершенствование механизмов управления разнородными ресурсами (процессорами, долговременной и оперативной памятью, хранилищами и базами данных, сетями) с целью достижения высокой производительности и устойчивости распределенных приложений. Современные технологии построения РСОИ (Grid, CORBA, J2EE, РСУБД) позволяют реализовать коллективный разделяемый режим доступа к ресурсам и к связанным с ними услугам в рамках географически распределенной инфраструктуры [5, 7].

---

<sup>1</sup> Сергей Викторович Козлов, кандидат технических наук (kozlov\_sv@mail.ru).

<sup>2</sup> Юрий Петрович Остриков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (тел. (4862) 54-97-32).

<sup>3</sup> Аркадий Леонидович Суханов, кандидат технических наук (als64@bk.ru).



В условиях жестких требований к качеству предоставляемых услуг на первый план выступает необходимость оптимального использования ограниченных ресурсов РСОИ с учетом изменяющихся требований к ним и ненадежности элементов инфраструктуры.

Применяемые в настоящее время в РСОИ методы и алгоритмы балансировки нагрузки, как правило, имеют целью достижение равномерной загрузки ресурсов и снижение перегрузок в РСОИ. При этом индивидуальные требования к качеству обслуживания пользователей либо не учитываются, либо учитываются косвенно с использованием механизма приоритетов в обслуживании, чего явно не достаточно [5]. Более продуктивным целесообразно считать подход, основанный на векторной оптимизации распределения ресурсов РСОИ, где в качестве частных критериев рассматривается максимизация степени достижения требований к качеству обслуживания каждого пользователя [2, 3]. Это требует разработки соответствующих моделей и методов оптимизации.

## 2. Задача оптимального распределения ресурсов

Представим РСОИ в виде модели «ресурс–потребитель» (РП-модели)  $S = \langle R, P, A \rangle$  (рис. 1).

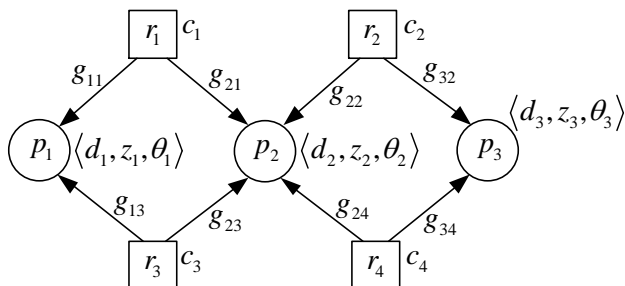


Рис. 1. Модель «ресурс–потребитель»

РП-модель содержит вершины двух типов:  $R = \{r_1, \dots, r_e\}$  – множество поставщиков ресурсов РСОИ,  $P = \{p_1, \dots, p_m\}$  – мно-

жество потребителей ресурсов. Будем считать, что все поставщики предоставляют пользователям ресурс одного типа. Чтобы учесть разнотипность ресурса, требуется определить отдельную модель  $S$  для каждого типа ресурса.

Каждый поставщик  $r_k$  может предоставить потребителям ресурс суммарным объемом не более  $c_k$ . Предположим, что весь ресурс поставщика может делиться любыми долями на любое число потребителей. Единицы измерения  $c_k$  должны соответствовать типу ресурса (таблица 1). Будем считать вектор  $\bar{C} = \{c_1, \dots, c_e\}$  известным и строго положительным.

Таблица 1. Величины и единицы измерения ресурсов РСОИ

Тип ресурса	Величина	Единица измерения
Сеть передачи данных	Пропускная способность	бит/с; число каналов
Системы распределенных вычислений	Вычислительная мощность	операций/с
Файловые серверы и сетевые хранилища	Объем памяти или дискового пространства	байт
Веб-серверы	Максимальный обслуживаемый поток запросов	запросов/с
Серверы баз данных	Скорость выполнения транзакций	транзакций/с

Для каждого потребителя  $p_i$  известна количественная мера его ресурсных требований  $d_i$ , которые измеряются в тех же величинах, что и объем поставляемого ресурса  $c_k$ . Таким образом, задается известный положительный вектор ресурсных требований  $\bar{d} = \{d_1, \dots, d_m\}$ .

Для удовлетворения своих потребностей каждый потребитель может использовать ресурс одного или нескольких поставщиков одновременно, т.е. диверсифицировать поставки. Структура поставок определяется матрицей связности  $A = (a_{ik})$ , где  $a_{ik} = 1$ , если  $i$ -й потребитель может использовать ресурс  $k$ -го поставщика, и  $a_{ik} = 0$  в противном случае. Матрица  $A$  предполагается известной.

Обозначим  $g_{ik}$  величину ресурса, предоставляемого  $k$ -м поставщиком  $i$ -му потребителю. Матрица  $G = (g_{ik})$ ,  $g_{ik} \geq 0$ , задает распределение ресурсов РСОИ. Каждое распределение  $G$  однозначно определяет вектор обеспеченных ресурсных требований

$\bar{z} = \{z_1, \dots, z_m\}$ , где  $z_i = \sum_{k=1}^e g_{ik}$ . Очевидно, что для рациональных

распределений должно выполняться условие  $z_i \leq d_i$ , что соответствует принципу разумной достаточности: совокупный объем ресурса, полученный каждым потребителем, не может превышать его потребностей. Кроме того, объем ресурса, отданный каждым поставщиком, не может превышать имеющегося у него объема  $c_k$ . Таким образом, допустимое распределение  $G$  должно удовлетворять ограничениям

$$(1) \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^e g_{ik} \leq d_i, & i = 1, 2, \dots, m, \\ \sum_{i=1}^m g_{ik} \leq c_k, & k = 1, 2, \dots, e. \end{cases}$$

Задача оптимального распределения ресурсов заключается в нахождении такого распределения  $G^*$ , которое в наиболее полной мере удовлетворяло бы ресурсным требованиям  $\bar{d}$ . Степень обеспеченности ресурсных требований (о.р.т.) для  $i$ -го потребителя будем определять коэффициентом о.р.т.:

$$(2) \quad K_i^{\text{opt}} = \frac{z_i}{d_i}.$$

При этом  $0 \leq K_i^{\text{opt}} \leq 1$ . Обеспеченность ресурсных требований для всей РСОИ оценивается вектором о.р.т.:

$$(3) \quad \bar{K}_{\text{opt}} = \left( \frac{z_1}{d_1}, \dots, \frac{z_m}{d_m} \right).$$

Таким образом, рассматриваемая задача оптимизации может быть представлена в виде

$$(4) \quad G^* = \arg \max_{G \in \{G\}} \{ \bar{K}_{\text{opt}} \},$$

где  $\{G\}$  – множество всех распределений ресурсов, удовлетворяющих ограничениям (1). Максимальное значение  $\overline{K}_{\text{орт}}$  обозначим  $\overline{K}_{\text{орт}}^*$ .

Условия работы РСОИ таковы, что в ней могут происходить флуктуации векторов ресурсов  $\overline{c}$  и ресурсных требований  $\overline{d}$ . При этом вектор  $\overline{z}$  отклоняется от вектора  $\overline{d}$  при ухудшении ситуации и приближается при её улучшении. Степень такого отклонения оценивается вектором  $\overline{K}_{\text{орт}}$ . Задачей системы распределения ресурсов является подстройка матрицы  $G$  под изменившуюся ситуацию путем решения оптимизационной задачи (4) (рис. 2).

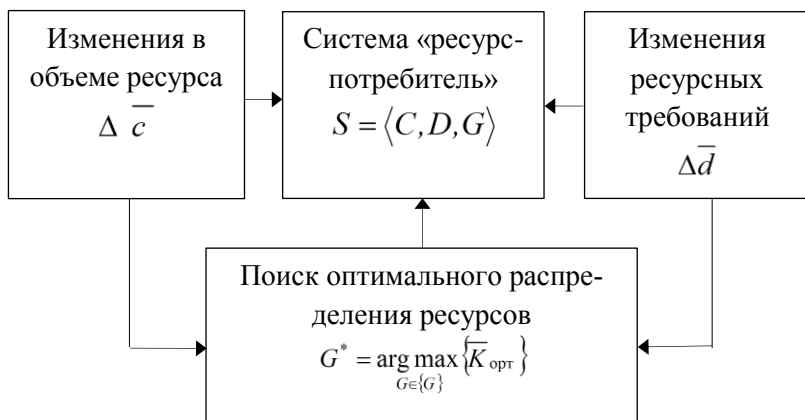


Рис. 2. Схема распределения ресурсов РСОИ

### 3. Исследование модели оптимального распределения ресурсов

Существование допустимых распределений ресурсов следует из совместности системы линейных неравенств (1). Для доказательства совместности представим систему (1) в обобщенном виде (5).

$$(5) \quad \sum_j g_j \leq a_i, g_j \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, m+1, \dots, m+e.$$

Поскольку все свободные члены  $a_i$  неотрицательны (в силу положительности векторов  $\bar{c}$  и  $\bar{d}$ ), то неравенства (5) всегда будут выполняться при  $g_j = 0$ . Следовательно, система (1) имеет по крайней мере одно тривиальное решение. Покажем, что она имеет и нетривиальные решения. Для этого предположим, что все свободные члены  $a_i$  строго положительны. Те неравенства, для которых  $a_i = 0$ , из системы можно исключить, поскольку они дают только тривиальные решения. Пусть  $a_{\min} = \min \{a_i\}$ . Тогда соответствующее неравенство системы (5) можно преобразовать в равенство (6) путем добавления свободного члена  $q$ :

$$(6) \quad \sum_j g_j + q_i = a_{\min}, \quad 0 \leq q \leq a_{\min}.$$

Следовательно, любое из  $g_j$  может быть увеличено на величину  $q$ , так что все неравенства (5) будут выполняться, причем одно из них будет строгим. Это значит, что система (1) имеет как минимум одно нетривиальное решение. Следовательно, данная система неравенств совместна, а определяемое ей множество допустимых распределений  $\{G\}$  не пусто.

Из совместности системы (1) следует, что множество ее решений представляет собой выпуклый ограниченный многогранник в пространстве  $R^n$  с осями координат, соответствующими всем  $g_j$  [6]. Каждой точке многогранника решений соответствует допустимое распределение  $G$ . Многогранник решений ограничен снизу координатными плоскостями, а сверху – гиперплоскостями, описываемыми уравнениями  $\sum_j g_j = a_i$ . Рас-

пределение ресурсов  $G^*$ , оптимальное по векторному критерию (4), обеспечивает максимум по всем  $\bar{K}_i^{\text{opt}}$  одновременно. Если  $\bar{K}_{\text{opt}}^* = 1$ , то ресурса РСОИ достаточно для удовлетворения требований потребителей, в противном случае выполнить эти требования путем перераспределения ресурсов невозможно. Такая ситуация может возникнуть, например, при выходе из строя элементов РСОИ.

Если распределение  $G$  таково, что улучшение по одному из  $K_i^{\text{opt}}$  невозможно без ухудшения  $K_i^{\text{opt}}$  других потребителей, то  $G$  – распределение, оптимальное по Парето [4]. Множество рас-

пределений, не доминирующих друг над другом по вектору о.р.т., составляет множество Парето-оптимальных распределений. Очевидно, что область Парето-оптимальных распределений представляет собой поверхность выпуклого многогранника решений системы (1), не совпадающую с координатными плоскостями.

Рассмотрим РП-модель в условиях недостаточности ресурсов, когда значение  $\bar{K}_{\text{орт}}^* = 1$  недостижимо. Такая ситуация может возникнуть в результате повреждений элементов РСОИ или резкого увеличения ресурсных требований. Возникающий при этом дефицит ресурсов приводит к росту конкуренции потребителей. В этом случае становится актуальным распределение ресурсов на основе некоторого компромисса, а свертка векторного критерия (4) должна быть такой, чтобы никто из потребителей не был дискриминирован и при этом были использованы все возможные ресурсы РСОИ, пока они могут пригодиться хотя бы одному потребителю. Очевидно, что компромиссное решение должно принадлежать области Парето.

Одним из компромиссных методов свертки векторного критерия является метод максимина, в основе которого лежит принцип гарантированного результата. Целесообразность его применения в задачах векторной оптимизации с равнозначными частными критериями показана в работах [3, 4]. Исходя из этого исходная оптимизационная задача (4) может быть представлена в виде

$$(7) \quad G^* = \arg \max_{G \in \{G\}} \min(K_i^{\text{орт}}, i = 1, \dots, m).$$

Максиминный критерий (7) позволяет гарантировать максимальное значение коэффициента о.р.т. того потребителя, который находится в наихудших условиях в смысле уровня обеспеченности его ресурсных требований.

Распределение ресурса  $G^*$ , отвечающее критерию (7), называется конкурентным [3]. Соответствующее ему значение  $K_i^{\text{орт}}$  называется величиной максиминной обеспеченности ресурсных требований. Будем обозначать его как  $\theta_0$ .

Рассмотрим простейший пример конкурентного распределения ресурса – два потребителя, конкурирующие за разделяемый ресурс единственного поставщика (рис. 3а).

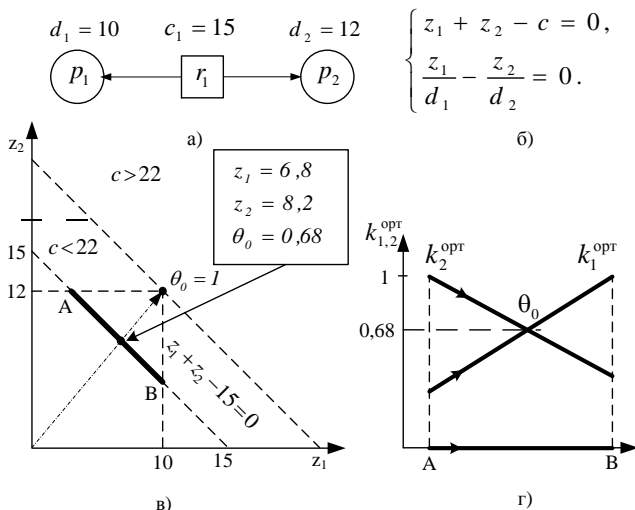


Рис. 3. Конкурентное распределение ресурсов одного поставщика двум потребителям

Очевидно, что максиминный уровень о.р.т. будет обеспечиваться при  $K_1^{opt} = K_2^{opt}$ . Для нахождения максиминного распределения ресурсов необходимо решить систему уравнений, представленную на рис. 3б. Область Парето-оптимальных распределений представлена отрезком АВ (рис. 3в). Точка  $\theta_0 = 0,68$ , оптимальная по критерию (7), может быть найдена, если двигаться вдоль отрезка АВ, начиная от одного из его концов, до тех пор, пока значения  $K_1^{opt}$  и  $K_2^{opt}$  не сравняются (рис. 3г).

Используя выводы, полученные в [4], в общем случае можно утверждать, что если  $\theta_0 < 1$ , то найдутся два или более потребителей, для которых выполняется соотношение  $K_{i1}^{opt} = K_{i2}^{opt} = \dots = K_{in}^{opt} = \theta_0$ . Данное соотношение определяет узкое место («бутылочное горло») всей РП-модели. В узком месте каждый конкурирующий потребитель получит объем ресурса,

пропорциональный его требованиям. Такой принцип справедливого распределения ограниченного ресурса соответствует известному принципу выравнивания Гермейера [1, 3].

Несмотря на то что максиминный критерий в наибольшей степени соответствует задачам недискриминирующего распределения ресурса РСИО, он не позволяет, в общем случае, получить Парето-оптимальных распределений, поскольку ориентирован на нижнюю границу о.р.т. [3], при которой всем потребителям обеспечивается  $\theta_0$ -я часть их требований, тогда как для многих из них коэффициенты о.р.т. могли бы быть улучшены. Таким образом, невозможность обеспечить требования одних потребителей не способствует стремлению удовлетворить требования остальных. Тем не менее сама структура РП-модели ставит ее потребителей в неравные условия, учет которых позволяет выбрать из всех конкурентных распределений максимально обеспечивающее требования всех потребителей без дискриминации какой-либо из них. Такое распределение было предложено в работах [3] и названо суперконкурентным. Суперконкурентное распределение ресурсов определяется следующим образом. Обозначим через  $X_0(c, d)$  множество конкурентных распределений потоков

$$(8) \quad X_0(c, d) = \text{Arg max}_{G \in \{G\}} \left\{ \min_{i \in M} \frac{z_i}{d_i} \right\}.$$

Пусть  $M_0 \in M$  обозначает множество индексов  $i$  тех потребителей, которым нельзя увеличить  $K_i^{\text{opt}}$  выше, не понизив при этом о.р.т. какого-либо потребителя ниже величины  $\theta_0$  (9).

$$(9) \quad M_0 = \left\{ i \in M \left| \frac{z_i}{d_i} = \theta_0, \forall G \in X_0(c, d) \right. \right\}.$$

Если  $M_0 \neq M$ , то существуют такие распределения ресурсов, которые являются конкурентными не только на нулевом, но и на более высоких уровнях обеспеченности требований  $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_L$ . Множества конкурентных распределений более высоких уровней определяются рекурсивно (10).



$$X_{i+1}(c, d) = \text{Arg max}_{G \in X_i(c, d)} \left\{ \min_{i \in M \setminus \bigcup_{j=0}^i M_j} \frac{z_i}{d_i} \right\} = \left\{ G \in X_i(c, d) \mid \min_{i \in M \setminus \bigcup_{j=0}^i M_j} \frac{z_i}{d_i} = \theta_{i+1} \right\},$$

$$(10) \quad \theta_{i+1} = \max_{G \in X_i(c, d)} \min_{i \in M \setminus \bigcup_{j=0}^i M_j} \frac{z_i}{d_i},$$

$$M_{i+1} = \left\{ i \in M \setminus \bigcup_{j=0}^i M_j \mid \frac{z_i}{d_i} = \theta_{i+1}, G \in X_{i+1}(c, d) \right\}.$$

Рекурсивное построение повторяется до тех пор, пока все потребители не будут исчерпаны. Очевидно, что количество уровней  $L \leq m$ . Любое конкурентное распределение максимально возможного уровня называется суперконкурентным или лексикографически оптимальным [3]. Ему соответствует вектор  $\bar{Z}^L = (z_1^L, \dots, z_m^L)$  с компонентами (11).

Ни один компонент  $z_i^L$  не может быть увеличен без уменьшения какого-либо другого компонента. Таким образом, суперконкурентное распределение является Парето-оптимальным. РП-модель с двумя уровнями суперконкурентного распределения ресурсов представлена на рис. 4.

$$(11) \quad z_i^L = \begin{cases} \theta_0 d_i & | i \in M_0, \\ \dots, \\ \theta_L d_i & | i \in M_L. \end{cases}$$

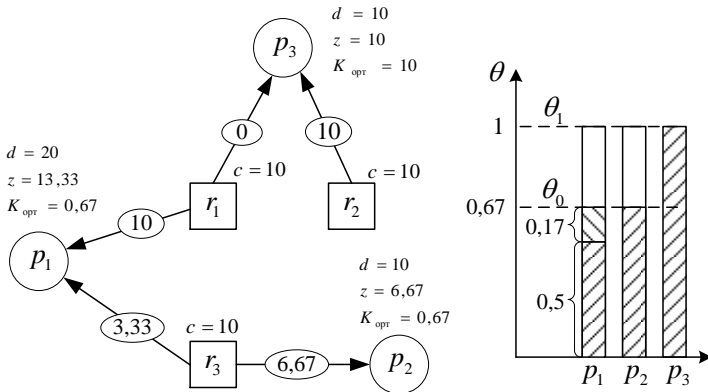


Рис. 4. Суперконкурентное распределение ресурсов при  $\theta_0 < 1$

#### 4. Обобщенный двухуровневый критерий оптимального распределения ресурсов

Если  $\theta_L = 1$ , то РП-модель имеет достаточно ресурса для полного обеспечения ресурсных требований одного или более (возможно, даже всех) потребителей. При этом ресурса может быть даже больше, чем требуется, так что часть его остается нераспределенной. Ни вектор, ни уровни о.р.т. не дают количественной оценки степени избыточности ресурса.

В условиях избытка ресурса для ряда потребителей суперконкурентное распределение может быть не единственным, а значит и решение задачи оптимизации будет неопределенным. Пример такой РП-модели представлен на рис. 4.

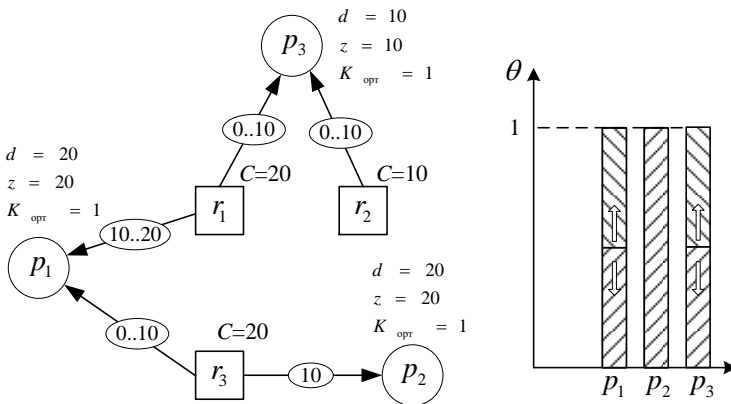


Рис. 4. Суперконкурентное распределение при избытке ресурсов

Решить проблему неоднозначности лексикографического максиминного критерия (10) для случая  $\theta_L = 1$  возможно путем введения дополнительного критерия оптимальности, который бы учитывал приоритетность в выборе потребителем поставщиков ресурсов. Таким образом, целевая функция распределения ресурсов должна стремиться не только в максимальной степени удовлетворить все потоковые требования, но и сделать это наиболее предпочтительным для потребителей способом.

Каждому из поставщиков, предоставляющему ресурс  $i$ -му потребителю, припишем весовой коэффициент  $w_{in}$ . При этом веса должны строго возрастать в соответствии с порядком их предпочтения для потребителя:  $W_{i1} > W_{i2} > \dots > W_{iN_i}$ . Тогда, используя аддитивную свертку, получим критерий максимума средневзвешенного суммарного ресурса  $Z_w$ :

$$(12) Z_w = \max_{G \in \{G^*\}} \sum_{i \in M} \sum_{n \in N_i} w_{in} g_{in}.$$

С учетом критерия предпочтения (12) задача оптимизации распределения ресурсов может быть сформулирована в следующем виде:

$$(13) G^{**} = \arg \max_{G \in X_L(c,d)} \sum_{i \in M} \sum_{l \in L_i} w_{il} g_{il},$$

где  $X_L(c, d)$  – множество суперконкурентных распределений, которое определяется рекурсивно по формуле (10); веса путей  $w_{in}$  задаются априорно исходя из некоторого критерия предпочтения.

Таким образом, задача (13) – двухкритериальная с приоритетом критерия. Приоритетный критерий – лексикографический максимин вектора о.р.т. (10).

Если полученное по первому критерию множество суперконкурентных распределений содержит более одного варианта, то из них выбирается максимальный относительно средневзвешенного суммарного ресурса  $Z_w$  (12).

## 5. Выводы и направления дальнейших исследований

Представленная в данной работе модель оптимального распределения ресурсов учитывает индивидуальные требования пользователей РСОИ к качеству обслуживания через ресурсные требования услуг и распределенных приложений. Поскольку пространство допустимых распределений по-разному проявляет свои свойства в условиях недостатка и в условиях избытка ресурсов, то целевая функция формируется на основе обобщенного критерия оптимизации, работающего и в тех и в других условиях.

В настоящей работе не рассмотрен ряд вопросов, требующих дополнительного исследования. Во-первых, требуется

определить необходимые и достаточные условия существования и единственности решения рассмотренной задачи оптимизации по обобщенному критерию (13). Во-вторых, требуется обобщить свертку (12) для случая линейно упорядоченного множества предпочтений, чтобы сделать ее нечувствительной к выбору числовых значений действительных коэффициентов  $w_{in}$ . В-третьих, необходимо исследовать задачу оптимизации для дискретного ресурса.

### **Литература**

1. ГЕРМЕЙЕР Ю.Б. *Введение в теорию исследования операций*. – М.: Наука, 1972. – 384 с.
2. КОЗЛОВ С.В. *Алгоритм оптимизации распределения потоков в телекоммуникационной сети на основе суперконкурентного резервирования ресурсов* // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №3(49). – С. 42–46.
3. МАЛАШЕНКО Ю.Е., НОВИКОВА Н.М. *Модели неопределенности в многопользовательских сетях*. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 160 с.
4. МАШУНИН Ю.К. *Методы и модели векторной оптимизации*. – М.: Наука, 1986. – 142 с.
5. ТАНИНБАУМ Э. ВАН СТЕЕН М. *Распределенные системы. Принципы и парадигмы*. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.
6. ЧЕРНИКОВ С.Н. *Системы линейных неравенств* // Успехи математических наук. – 1953. – Т. 8, вып. 2(54). – С. 8–68.
7. TALIA D. *The Open Grid Services Architecture* // IEEE Internet Computing. – 2002. – November/December. – P. 124–132.

## **OPTIMAL RESOURCE ALLOCATION BASED ON TWO-LEVEL CRITERION**

**Sergey Kozlov**, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel, Cand.Sc. (kozlov\_sv@mail.ru).

**Uriy Ostrikov**, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel, Cand.Sc., ((4862)54-97-32).

**Arkadiy Suhanov**, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel, Cand.Sc. (als64@bk.ru).

*Abstract: We discuss the model of optimal resource allocation in a distributed data processing system. A two-level vector optimization criterion is used for allocation.*

**Keywords:** resource-consumer model, vector optimization, superconcurrent resource allocation, lexicographical maxmin.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии С.Г. Куливым*

*Поступила в редакцию 04.09.2014.  
Опубликована 31.03.2014.*

УДК 004.62  
ББК 73.6

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ РЕШЕТОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

**Котельников А. В.<sup>1</sup>, Лебедев В. Б.<sup>2</sup>**

*(Пензенский государственный университет, Пенза)*

*Рассмотрены вопросы создания системы охраны территорий и объектов стратегического назначения. Предложены структура и способ построения такой системы, использующие методы теории решеток. Для обработки и анализа информации с датчиков физических величин и последующего принятия решений применяются решетки, построенные с помощью оператора замыкания.*

Ключевые слова: обработка и анализ информации, датчик, решетка, диаграмма Хассе, оператор замыкания.

### **1. Введение**

Для охраны территорий, объектов стратегического назначения, в том числе государственных границ, применяются различные системы, включающие в себя разнообразный набор компонентов и реализующие широкий перечень методов обработки данных. Для обнаружения различных типов нарушителей и повышения качества обнаружения используют специальные алгоритмы обработки поступающей информации и специальную аппаратуру для приема (сбора), обработки и анализа дан-

---

<sup>1</sup> Александр Валерьевич Котельников, аспирант кафедры «Информационное обеспечение управления и производства» (kotelnikov88@gmail.com).

<sup>2</sup> Виктор Борисович Лебедев, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационное обеспечение управления и производства» (lvvbb@mail.ru).

ных [10]. В качестве средств сбора информации чаще всего используются датчики, преобразующие различные физические величины. Датчики и группы датчиков могут объединяться в сенсорную сеть, которая представляет собой распределённую, самоорганизующуюся сеть множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединённых между собой посредством радиоканалов. В настоящее время наблюдается тенденция перехода к высокоинформативным многосенсорным системам с множеством датчиков, объединённых в единую информационную систему – «паутину датчиков». Такое объединение датчиков в единую информационную систему приводит к возникновению синергетических эффектов, благодаря которым существенно улучшается качество и доступность измерительной информации, повышается надёжность и помехоустойчивость системы [2].

Наибольшую популярность в настоящее время приобретают многосенсорные системы на базе автономных сетевых датчиков. Такие датчики отличаются малой стоимостью, высокой надёжностью и простотой установки [12]. Беспроводные сети имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными сетями датчиков. Во-первых, беспроводная сеть может быть развернута очень близко к объекту наблюдения, что повышает точность его идентификации; во-вторых, она охватывает большую площадь, что играет важную роль при определении координат и траектории движения объекта наблюдения.

## **2. Построение системы**

Предлагаемая к разработке система обнаружения объектов состоит из сети датчиков, измеряющих такие параметры как:

- колебания земной коры (для измерения используются сейсмодатчики);
- акустическую нагрузку (для измерения используются акустические датчики);
- акустические колебания, распространяющиеся в водной среде (для измерения используются гидроакустические датчики);

– прочие (для измерения используются магнитометрические, инфракрасные датчики и др.).

В состав системы обнаружения входят ретрансляторы, необходимые для приема сигналов от датчиков и передачи их на пункты приема, а также подсистема автоматизированного сбора, передачи и обработки информации. Обобщенная схема построения многосенсорной системы обнаружения объектов представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Обобщенная схема многосенсорной системы обнаружения объектов*

Большинство из перечисленных выше датчиков являются либо телеметрическими (имеющими специальный встроенный модуль связи), либо подсоединяются к устройствам связи, необходимым для беспроводной передачи информации. Такой принцип обеспечивает возможность удаленного измерения и сбора



информации с последующим ее предоставлением оператору или пользователю.

### **3. Постановка задачи обработки информации**

Для обработки сигналов, поступающих с множества типов датчиков, необходимо разработать алгоритм объединения данных, позволяющий произвести анализ получаемой информации, повысить вероятность обнаружения, точность идентификации объектов обнаружения, уменьшить количество ложных срабатываний.

При объединении данных от множества датчиков необходимо учитывать взаимное влияние и пересечение зон чувствительности датчиков, а также влияние внешних дестабилизирующих факторов. Для этого проверяется реакция множества датчиков разного физического принципа действия на типовые воздействия и, в зависимости от этой реакции, определяются комбинация датчиков и вариант алгоритма объединения данных. Это дает возможность проведения точных измерений, несмотря на недостатки отдельных датчиков.

Основным алгоритмом такого типа является многомасштабный частотно-временной анализ, который позволяет выделить тонкую структуру сейсмоакустических сигналов [11]. Идентификация объекта обнаружения осуществляется путем сравнения с уже существующими в памяти беспроводной сети датчиков (БСД) классами объектов. Для сравнения могут использоваться алгоритмы кластерного анализа, при котором осуществляется разбиение совокупности объектов по характерным признакам на однородные группы [9].

Вероятность идентификации объекта повышается при условии наличия в алгоритмах способности к самообучению и возможности сохранять при этом свойство функционирования в автономном режиме в случае потери связи с другими датчиками БСД(распределенная обработка информации).

Для комплексного анализа информации предлагается использовать алгоритм комбинаторно-упорядоченного моделирования (КУМ), основанный на методах теории решеток [3] и позволяющий реализовать возможность самообучения и клас-

сификации обнаруживаемых объектов. В методе КУМ качестве модели данных применяется решетка  $L_\psi$  которая образуется с помощью оператора замыкания  $\hat{A} = \bigcap R_A$ , заданного на исходном порождающем семействе множеств  $\{R\} \subseteq 2^P$  (например, семействе множеств сигналов разных типов датчиков), где  $A \subseteq \bigcup R, A \subseteq R_A, R_A \in \{R\}, P = \bigcup_{R \in \{R\}} R$  – носитель модели  $L_\psi$  [3].

Таким образом, замыкание множества  $\hat{A} = \bigcap R_A$  равно пересечению всех таких элементов порождающего семейства множеств  $\{R\}$ , которые содержат множество  $A$ . Элементами решетки являются все замкнутые множества, удовлетворяющие условию  $A = \hat{A}$ . Семейство замкнутых подмножеств  $A \subseteq P$ , удовлетворяющих условию  $A = \hat{A}$ , образует относительно включения полную решётку  $L_\psi$  с теоретико-решетчатыми операциями  $A \vee B = A \hat{\cup} B$  и  $A \wedge B = A \cap B$ , где  $A, B \in L_\psi$  и  $\hat{\cup}$  – обозначает операцию замыкания объединения множеств. Таким образом, модель данных в виде решетки обладает алгебраическими свойствами, что позволяет повысить эффективность анализа данных. Структурные нуль  $0$  и единица  $1$  решётки  $L_\psi$  задаются выражениями  $0 = \hat{\emptyset} = \bigcap R_\emptyset = \bigcap_{R \in \{R\}} R, 1 = P = \bigcup R = \bigcup_{R \in \{R\}} R$ . Решётка  $L_\psi$  характеризуется как частное булевой решётки  $B(P)$  относительно оператора замыкания  $\hat{A} = \bigcap R_A$ , причём нижние грани в  $L_\psi$  совпадают с нижними гранями в  $B(P)$  [1]. Практически во всех случаях рассмотренный метод обладает высокой эффективностью представления данных (точность и полнота представления). Визуализация решетки в виде диаграммы Хассе позволяет повысить эффективность интерпретации свойств моделируемых данных при анализе.

#### 4. Область применения метода КУМ

Метод КУМ основан на теории решеток, построенных с помощью оператора замыкания, и является универсальным

инструментом решения задач, связанных с обработкой информации. Установлено, что данный метод может быть эффективно использован в различных областях: в технологии добычи данных, для классификации объектов при распознавании образов, при структурном анализе систем управления, анализе и синтезе электронных схем и др. [3–7].

Особенностью метода КУМ является высокая адекватность представления структуры данных в виде решетки, образованной оператором замыкания. В частности, структура исходных данных в виде семейства порождающих множеств может быть адекватно представлена полной решеткой, упорядоченной включением [1]. Как правило, использование метода КУМ позволяет повысить эффективность анализа данных за счет адекватного представления их структуры в виде решетки.

Применение метода КУМ для решения задачи обработки и анализа информации, поступающей с датчиков физических величин, и последующего принятия решения (об обнаруживаемом объекте и проводимым над ним действиям) позволяет выявить взаимосвязи и взаимозависимости сигналов датчиков, влияющих на реакцию системы.

## **5. Реализация метода КУМ. Формулирование критериев анализа данных**

Основной алгоритм построения решётки  $L_{\psi}$  с помощью оператора замыкания  $\hat{A} = \bigcap R_A$  в качестве исходных данных использует семейство порождающих множеств  $\{R\}$  решётки  $L_{\psi}$  и ещё, может быть, множество  $P = \bigcup_{R \in \{R\}} R$ , расширяющее (доопределяющее) семейство  $\{R\}$ . Алгоритм строит последовательность таблиц, в которых элементы определяются как пересечения подмножеств элементов предшествующих таблиц. Исходные и результирующие данные алгоритма удовлетворяют условиям  $\{R\} \subseteq 2^P$ ,  $|\{R\}| = m \leq 2^{|P|}$ ,  $(A \in L_{\psi}) \Leftrightarrow (A = \bigcap R_A)$ . Обоснование алгоритма и оценка его трудоемкости приводится в работе [3]. Трудоемкость алгоритма определяется в основном числом элементов решетки  $L_{\psi}$ . Алгоритм является сходящимся и

строит решетку, общее число элементов в которой не превышает величины

$$\min \left\{ 2^m, 1 + \sum_{i=0}^n \binom{|P|}{i} \right\}$$

при  $n < |P|$ , или величины  $\min\{2^m, 2^n\}$  при  $n = |P|$ , где  $m = |\{R\}|$ ,  $n = \max_{R \in \{R\}} |R|$ ;  $\{R\}$  – семейство порождающих множеств решётки  $L_\psi$

и  $P = \cup R$  [3]. В практических задачах анализа данных обычно выполняются условия  $m \gg n$  и  $n < |P|$ , тогда трудоемкость алгоритма построения решетки  $L_\psi$  определяется величиной

$$O \left( \sum_{i=0}^n \binom{|P|}{i} \right),$$

которая может быть существенно уменьшена в случае задания ограничений на мощность получаемых элементов решетки.

В работе [7] показано, что, согласно теореме Э. Шпильрайна [1], обработка данных на решетке  $L_\psi$  может быть сведена к анализу данных на линейной векторной решетке  $\vec{L}_\varepsilon$ , и это значительно увеличивает быстродействие алгоритма.

Рассмотрим пример. Для выполнения анализа информации методом КУМ необходимо сформировать исходное порождающее семейство множеств  $\{R\}$  сигналов, поступающих с датчиков. Введем понятие признака сигнала, в соответствии с которым происходит идентификация объекта. Каждому типу датчика соответствует свое множество признаков сигнала. Предположим, что множества признаков сигнала для каждого из типов датчиков равноможны и однородны, т.е. характеризуют одинаковые признаки идентификации объектов распознавания (при этом, конечно, физические особенности сигналов для разных типов датчиков могут различаться).

Предположим, что анализ объектов проводится по сигналам трех типов датчиков: 1) акустических, 2) сейсмических и 3) магнитометрических.

Для каждого из трех типов датчиков определено следующее множество признаков сигналов: 1 – объект типа «человек»; 2 – объект типа «группа людей»; 3 – объект типа «животное»;

4 – объект типа «группа животных»; 5 – объект типа «транспортные средства»; 6 – объект типа «низколетящие вертолеты и БПЛА».

Пусть при анализе информации в течение первого промежутка времени измерений получено следующее порождающее семейство множеств сигналов:

$$(1) \quad \{R^{(1)}\} = \{\{1,2\}, \{2\}, \{1,2,3\}\}.$$

Здесь множествапорождающего семейства соответствуют множествам признаков сигналов в течение первого промежутка времени измерений для акустического, сейсмического и магнитометрического типов датчиков соответственно.

Для второго промежутка времени измерений получено следующее порождающее семейство множеств:

$$(2) \quad \{R^{(2)}\} = \{\{2,4,6\}, \{2,6\}\}.$$

Здесь множествапорождающего семейства соответствуют множествам признаков сигналов в течение второго промежутка времени измерений для акустического и сейсмического типов датчиков соответственно.

Для третьего промежутка времени измерений аналогично получено следующее порождающее семейство множеств:

$$(3) \quad \{R^{(3)}\} = \{\{1,2,4\}, \{2,3,4\}, \{2\}\}.$$

Для окончательного анализа объединим результаты измерений в каждом из трех промежутков времени в одно порождающее семейство множеств. Таким образом, объединенное порождающее семейство множеств будет иметь вид:

$$(4) \quad \{R\} = \{R^{(1)}\} \cup \{R^{(2)}\} \cup \{R^{(3)}\} = \\ = \{\{1,2\}, \{2,4,6\}, \{1,2,4\}, \{2\}, \{2,6\}, \{2,3,4\}, \{1,2,3\}, \{2\}\}$$

Решетка  $L_\psi$  строится с помощью алгоритма изложенного в [3]. Диаграмма Хассе решетки  $L_\psi$ , представлена на рис. 2.

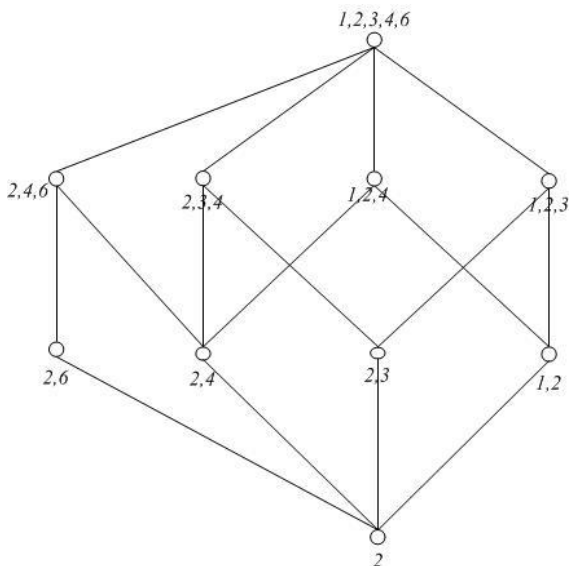


Рис. 2. Диаграмма Хассе решетки  $L_\psi$  показателей сигналов датчиков

Данная решетка имеет петлю 2 что означает, что признак сигнала 2 входит в показатели одновременно всех типов датчиков. Признаки сигналов 1, 3, 4 и 6 входят в атомы решетки. Анализ показывает, что решетка  $L_\psi$  содержит булевы подрешетки 2-го порядка (на элементах {4, 6}) и 3-го порядка (на элементах {1, 3, 4}). Информация для принятия решения получается из анализа структуры решетки.

Данный алгоритм целесообразно применять в случае регистрации датчиками в единицу времени большого количества различных параметров.

## 6. Обучение и классификация

При построении представленной выше системы должна быть заложена возможность самообучения в процессе распознавания различных типов объектов. Схема системы распознавания с возможностью обучения представлена на рис. 3.

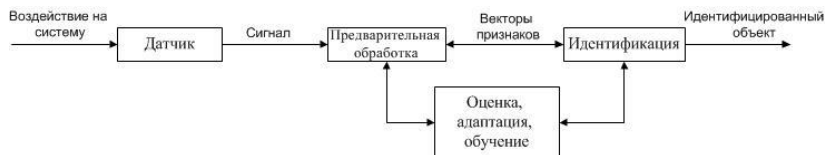


Рис. 3. Схема системы распознавания

Блок «Оценка, адаптация, обучение» аккумулирует в себе результаты прошлых вариаций сигналов, снимаемых с датчиков. Сигналы записываются и хранятся в базе данных. Здесь же происходит процедура обучения, которая представляет собой формирование элементарных классификаторов, т.е. выделения определенных характеристик, например, модели сигналов в виде решетки.

В качестве элементарных классификаторов в методе КУМ используются замкнутые множества решетки  $L_{ij}$ . Эти характеристики далее позволяют классифицировать оставшуюся часть выборки. Такой вид обучения следует отнести индуктивным [8].

## 7. Заключение

В результате рассмотрен способ построения систем охраны территорий и объектов стратегического значения, основанный на применении теории решеток. Обозначена структура системы и типы датчиков регистрации различных физических величин (акустические колебания, сейсмические колебания, магнитные поля и др.). Предложен способ обработки и анализа сигналов датчиков с целью получения наиболее точной и адекватной информации для идентификации объектов обнаружения и принятия решений по их обезвреживанию. Рассмотрена возможность построения системы с использованием принципов самообучения на основе формирования элементарных классификаторов.

## Литература

1. АЙГНЕР М. *Комбинаторная теория*. – М.: Мир, 1982. – 558 с.
2. ДМИТРИЕНКО А.Г., БЛИНОВ А.В., ИСАКОВ С.А., НОВИКОВ В.Н., ТУЖИЛКИН О.В. *Интеграция беспровод-*

- ных датчиков в измерительную сеть // Датчики и системы. – 2012. – №9. – С. 44–46.*
3. ЛЕБЕДЕВ В.Б. *Анализ ассоциаций данных методом комбинаторно-упорядоченного моделирования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2005. – №5(20). – С. 99–106.*
  4. ЛЕБЕДЕВ В.Б. *Моделирование структуры данных методами теории решеток // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сборник статей X Международной научно-технической конференции. – Пенза: Изд-во ПДЗ, 2010. – С. 41–45.*
  5. ЛЕБЕДЕВ В.Б., КОТЕЛЬНИКОВ А.В. *Исследование причин отказов датчиков и датчико-преобразующей аппаратуры на основе теории решеток // Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании. Сборник статей XXVIII международной научно-технической конференции. – Пенза: Изд-во ПДЗ, 2011. – С. 79–81.*
  6. ЛЕБЕДЕВ В.Б., МИНАЕВ В.Е. *Построение изоморфных решёток в задаче дискретной классификации // Университетское образование: сборник статей XII Международной научно-методической конференции. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2008. – С. 247–249.*
  7. ЛЕБЕДЕВ В.Б., ПАРШИНА Е.В., ПЕСОШИН В.А. *Эффективная модель анализа данных на основе линейных векторных решеток // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер. «Технические науки». – 2011. – №4(20). – С. 19–25.*
  8. ЛЮГЕР ДЖОРДЖ Ф. *Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: 4-е издание. Пер. с англ. – М.: «Вильямс», 2003. – 864 с.*
  9. МАНДЕЛЬ И.Д. *Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.*
  10. ПАРК ДЖ., МАККЕЙ С. *Сбор данных в системах контроля и управления: практическое руководство. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2006. – 504 с.*
  11. ПОСТНИКОВ Е.Б. *Частотно-временной анализ нестационарных сигналов при помощи интегрального вейвлет-*



*преобразования, основанного на решении дифференциальных уравнений в частных производных // Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустикаокеана. Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. – Т.2. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 46–48.*

12. УРМАНОВ Д., ПОЛЯКОВА О., ШУЛЬЦЕВА Е. *Применение беспроводных сенсорных систем для обеспечения безопасности различных подвижных и неподвижных объектов // Беспроводные технологии. – 2012. – №27(2). – С. 48–51.*

## USING LATTICE THEORY FOR INFORMATION PROCESSING IN DETECTION SYSTEMS

**Alexander Kotelnikov**, Penza State University, Penza, post graduate student (kotelnikov88@gmail.com).

**Viktor Lebedev**, Penza State University, Moscow, Doctor of Technology, professor (lvvbb@mail.ru).

*Abstract: We consider the problem of security systems development for land areas and strategic facilities. The results of lattice theory are used to justify the system structure and the approach to its design. We employ closure operator-based lattices to process and analyze data from sensors.*

Keywords: processing and analysis, sensor, lattice, Hasse diagram, closure operator.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко*

*Поступила в редакцию 23.02.2013.  
Опубликована 31.01.2014.*

УДК 371.263+004.82

ББК 74.00

## ОЦЕНКА ТРУДНОСТИ И СЛОЖНОСТИ УЧЕБНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ

Наумов И. С.<sup>1</sup>, Выхованец В. С.<sup>2</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления РАН, Москва)

*Предложено решение задачи автоматической оценки сложности и трудности учебных задач на основе синтаксического анализа текста, выявления предикативной структуры его предложений и построения на этой основе семантической сети. Для подсчета объема знаний в семантической сети разработан математический аппарат, базирующийся на определении семантических расстояний между понятиями-словами. Показано, что объем знаний, содержащихся в семантической сети, является мерой на множестве семантических сетей, а введенное расстояние превращает это множество в метрическое пространство.*

Ключевые слова: процесс обучения, педагогические измерения, трудность и сложность задач, синтаксический анализ, семантические сети, семантическое расстояние.

### 1. Введение

В последнее время большое число исследований направлено на автоматизацию и интеллектуализацию различных сфер деятельности. Однако в автоматизации обучения на сегодняшний день существует много нерешенных проблем. Такое положение дел связано с тем, что обучение представляет собой

---

<sup>1</sup> Игорь Савельевич Наумов, инженер (naigsa@gmail.com).

<sup>2</sup> Валерий Святославович Выхованец, доктор технических наук, доцент (valery@vykhovanets.ru).

сложный интеллектуальный процесс, плохо поддающийся формализации [3].

Заметной тенденцией в автоматизации обучения является разработка методов, методик и средств, реализующих индивидуальный подход к процессу обучения. К актуальным проблемам в этой области можно отнести проверку и оценку знаний, составление программ обучения, индивидуальный подбор учебных задач и др. Автоматический подбор учебных задач является одной из самых сложных проблем, так как связан с оценкой субъективной трудности и объективной сложности учебной задачи.

В процессе приобретения знаний условно можно выделить источник знаний – описание некоторой предметной области, или предмет обучения, и приемник знаний – субъект обучения. Знания предметной области признаются эталонными знаниями, которые остаются неизменными в течение всего процесса обучения, а знания обучающегося являются изменяемыми. Цель обучения – максимально полно передать знания предметной области обучаемому субъекту.

Основным средством проверки знаний является решение учебных задач. Учебную задачу можно рассматривать как содержащую знания предметной области, которые приобретает обучающийся в результате правильного решения задачи. Сравнение знаний, заключенных в учебной задаче, с соответствующими знаниями предметной области и текущими знаниями позволяет оценить сложность и трудность учебной задачи.

Однако в большинстве известных методик оценка сложности и трудности задачи осуществляется по косвенным критериям, например, по числу шагов решения, по времени решения, по вероятности решения и т.п. [28, 29].

Известен также подход, при котором сложность текста определяется по соотношению конкретных и абстрактных слов, по проценту новых слов, по длине предложений, по сложности логической структуры текста, а трудность оценивается после чтения текста на основе экспериментальной проверки понимания текста путем постановки вопросов к тексту и анализа ответов на эти вопросы [20].

Сегодня в области оценки сложности текстов популярны методы, основанные на анализе статистических закономерностей. Среди них можно выделить работы посвященные определению уровня читаемости текста [32, 33]. Недостаток таких методов заключается в том, что они не учитывают содержательные взаимосвязи слов, которые являются ключевыми для «понимания» смысла текста.

В итоге известные методы оценки сложности и трудности текстов и учебных задач не позволяют строить и использовать эффективные индивидуальные программы обучения. Поэтому проблема оценки сложности и трудности задач остается актуальной до сих пор.

В настоящей работе рассмотрен метод оценки сложности и трудности учебной задачи, основанный на автоматическом синтаксическом анализе текстов. В результате синтаксического анализа учебного материала строится семантическая сеть предметной области, которая представляет собой набор вершин (понятий предметной области) и набор связей (отношений между понятиями). Для построения семантической сети обучающегося строится объединенная семантическая сеть задач, которые правильно решил обучающийся. В этом случае оценка сложности и трудности новой учебной задачи осуществляется путем сравнения семантических сетей предметной области, семантической сети задачи и семантической сети обучающегося.

## **2. Сложность и трудность**

Понятия «сложность» и «трудность» в научной литературе зачастую используют как синонимы. Между тем эти понятия имеют различное содержание и в рассматриваемой задаче играют ключевую роль. Обычно под сложностью понимают объективную оценку, а под трудностью – субъективную [18, с. 86].

Понятия «сложность» и «трудность» характеризуют связь между субъектом, решающим задачу, и объектом – учебной задачей. При этом трудность и сложность задачи зависят от различных объективных и субъективных факторов. Например, к объективным факторам относятся предмет задачи, требования

задачи, условия задачи, а к субъективным – способности и подготовке субъекта, его мотивация, психическое и физическое состояние и др. [4, с. 62].

В итоге имеем, что каждая задача может иметь две независимые оценки: сложность и трудность. Под сложностью задачи будем понимать объективную характеристику, которая определяется объемом предметных знаний, достаточных для ее решения. В свою очередь под трудностью задачи будем понимать субъективную характеристику, которая может быть получена путем сопоставления знаний, достаточных для решения задачи, со знаниями, имеющимися у обучающегося.

Следует заметить, что трудность задачи не может быть больше сложности: в процессе обучения сложность задачи является достижимым пределом трудности. Количественные оценки сложности и трудности задачи непосредственно связаны с процессами извлечения и сравнения знаний.

### **3. Знания и данные**

В самом общем виде знание определяется как проверенный на практике результат отражения объективной действительности, представленный в сознании субъекта в виде понятий и суждений, утвержденных некоторой последовательностью умозаключений [10, ст. «Знание»]. С гносеологической точки зрения знание определяется как субъективно обоснованное убеждение [7, с. 12]. Тем самым признается субъективная (внутренняя) природа знания. В объективном смысле знание рассматривается как представленный во внешней форме результат субъективного познания, признаваемый объективно истинным в некоторый исторический момент [25, ст. «Знание»]. Считается, что идеальность знаний является адекватным следствием тех свойств внешнего мира, которую они отражают.

Знания формируются в результате целенаправленного педагогического процесса, самообразования и жизненного опыта. Отсюда, в частности, следует, что знания нуждаются в своей объективации, т.е. отчуждении от носителя знаний в некоторой внешней объективной форме. Так как во внутренней (идеаль-

ной) форме передачу знаний осуществить нельзя, то используются внешние формы в виде специальным образом обустроенных данных. Историческим примером такого обустройства является естественный язык (язык-речь и язык-письмо).

Для передачи знаний используется синтаксически и семантически разомкнутые формы представления, предполагающие существование некоторых подразумеваемых знаний как о предметной области, относительно которой эти знания выражаются, так и знаний о форме выражения передаваемых знаний. Только согласовав эти фоновые (подразумеваемые) знания и знание структуры и правил интерпретации форм представления знаний, появляется возможность адекватной передачи и усвоения новых знаний.

Для представления и передачи знаний используются данные, которые рассматриваются как последовательность состояний (временная или пространственная) некоторого материального объекта (процесса, явления). Данные воспринимаются субъектом как содержащие некоторую информацию. В зависимости от эмоционального состояния субъекта, особенностей его восприятия и имеющихся у него фоновых знаний одни и те же данные воспринимаются как содержащие разную информацию. Следовательно, информацию можно определить как результат интерпретации данных, осуществляемой при определенном, возможно неполном знании их структуры и правил интерпретации.

С прагматической точки зрения знания представляются как «данные, полученные в нужном месте и в нужное время для решения практической задачи» [12, с. 50]. С этой точки зрения знания и данные не отличаются по своей структуре и способу хранения. Данные становятся знаниями тогда и только тогда, когда они соответствующим образом проинтерпретированы машиной или человеком.

Иная точка зрения на знания используется в «искусственном интеллекте» [19, с. 224], где знания отличаются от данных своей структурой. Данные представляют собой знания, если они:

– упорядочены в соответствии с концептуальной моделью предметной области (предметной онтологией);

- представлены в одной из форм представления знаний (семантическими сетями, фреймами, сценариями, продукциями и др.);
- имеют процедуру получения новых (скрытых) знаний из имеющихся (задана эффективная процедура вывода на знаниях);
- хранятся таким образом, который обеспечивает высокую эффективность типовых операций над знаниями (поиск на графах, анализ иерархий, логический вывод и др.).

В итоге получаем, что данные должны храниться, давать возможность поиска, проверяться, поддерживаться и обновляться. Знания, в свою очередь, хранятся как данные, но в отличие от данных должны преобразовываться из одной формы представления в другую и иметь процедуру вывода знаний. Однако основная трудность при работе со знаниями заключается не в представлении и оперировании знаниями, а в их первичном извлечении.

#### **4. Извлечение знаний**

Рассмотрим известную классификацию методов извлечения знаний [9, с. 100]. Коммуникативные методы извлечения знаний (рис. 1) предполагают непосредственное взаимодействие людей, а именно взаимодействие инженера по знаниям – приемника знаний и эксперта в предметной области – источника знаний.

Коммуникативные методы разделяются на пассивные и активные: в пассивных методах ведущую роль играет эксперт, а в активных – инженер по знаниям. Полная автоматизация коммуникативных методов извлечения знаний в настоящее время проблематична по причине ключевой роли в этом процессе субъектов-носителей и субъектов – получателей знаний.

Текстологические методы подразумевают под источником знаний различного рода документы (методики, пособия, руководства, монографии, учебники и др.). Выделяются три класса текстологических методов, направленных на анализ специальной литературы, на анализ учебников и на анализ документов. Эти методы отличаются по объему фоновых знаний, которые требуются для извлечения знаний из анализируемых текстов.



Рис. 1. Классификация методов извлечения знаний

Наиболее простым методом является метода анализа учебников. Анализ документов, в отличие от анализа учебников, усложнен тем, что знания в них сильно сжаты: документы содержат мало рассуждений, пояснений и комментариев. В свою очередь специальная литература требует использования большого объема фоновых знаний и поэтому является самой трудной для текстологического извлечения знаний.

В отличие от коммуникативных текстологические методы позволяют автоматизировать процесс извлечения знаний. Причина тому – наличие у текстов некоторой единой формальной структуры. Однако группа текстологических методов на сегодняшний момент оказалась наименее изученной. Трудности, с которыми столкнулись исследователи, состоят в том, что до сих пор не решена задача семантического анализа текста, заключающаяся в извлечении смысла, содержащегося в тексте, и его преобразование в одну из известных форм представления знаний [5, 27].

Восприятие любого текста осуществляется на четырех уровнях понимания [17]:



– понимание контекстуальных значений слов и предложений (физическое восприятие текста и понимание прямого, «поверхностного» значения слов и предложений);

– понимание переносных и символических смыслов (соотнесение с контекстом, понимание «глубинных» значений слов и предложений, соотнесение с фоновым знанием, осознание смысла текста, его концепта);

– понимание характеров и настроений персонажей (интеллектуально-эмоциональное восприятие текста);

– понимание авторского отношения к излагаемому материалу.

Первый уровень – языковой, требует знание языка. Путем «соединения» смысла слов на этом уровне происходит понимание смысла предложения как семантической единицы текста.

Второй уровень – смысловой, или уровень смыслового понимания всего текста. На этом уровне происходит анализ связей между смысловыми единицами текста – предложениями.

Третий уровень – личностный. На этом уровне читатель соотносит смысл прочитанного текста со своим жизненным опытом и знаниями. Путем размышлений читатель пытается понять авторский замысел.

Четвертый уровень – рефлексивный. На этом уровне читатель строит образ автора и соотносит свое отношение к прочитанному тексту с отношением к этому тексту самого автора.

Очевидно, текстологические методы работают на языковом уровне и не претендуют на более высокие уровни «понимания» текста. Однако для многих прикладных областей, в том числе и для оценки сложности и трудности учебных задач, достаточным оказывается не полное или частичное извлечение знаний из текстов, а их качественная идентификация.

## **5. Идентификация знаний**

Известно, что любой связный текст порождает некоторое семантическое пространство. «Семантическое пространство слов – это область существования и функционирования их лексических значений. Значения же слов существуют не изолированно, а находятся в определенных отношениях и связях друг

с другом, благодаря чему оказываются связанными и слова как языковые единицы» [31].

Семантические связи в тексте можно разделить на явные и неявные. Явные связи – это связи, непосредственно заданные в тексте и устанавливаемые на этапе его синтаксического анализа. К неявным связям относятся связи между словами, определяемые фоновым знанием и свойственные любому естественному языку [27].

Однако большая часть семантических связей выявляется на этапе синтаксического анализа, так как при написании текстов стараются минимизировать необходимый объем фоновых знаний. В противном случае тексты с большим числом неявных связей трудны для чтения и понимания.

Лексическим значением слова является выражаемое им понятие. «Понятие – мысль, которая выделяет из некоторой предметной области и собирает в класс (обобщает) объекты посредством указания на их общий и отличительный признак» [24].

Следует заметить, что отношения между понятиями, в отличие от отношений между словами, имеют некоторые специфические особенности: понятие может выражаться не одним, а множеством слов, два понятия могут быть связаны отношениями, различающимися в различных областях знаний, понятие может иметь отношения к самому себе. Также немаловажно то, что понятия, в отличие от понятий-слов, использованных в некотором тексте, не является завершенным результатом познания: понятия находятся в постоянном содержательном уточнении и изменении [16].

В качестве основного положения описываемого подхода примем предположение о том, что идентификация знаний, содержащихся в тексте, может быть осуществлена путем анализа последовательности его слов. В этом случае прикладные понятия, имеющие различное выражение в тексте, рассматриваются как разные понятия.

Тогда произвольный текст может быть представлен как последовательность понятий-слов, связанных между собой явными и неявными отношениями, а знания, содержащиеся в тексте, могут быть идентифицированы явными отношениями между его

словами с точностью до неявных отношений, порождаемых фоновым знанием. Например, такие абстрактные понятия как «Прямая» и «Точка» имеют явные отношения, выражаемые следующими предложениями: «точка лежит на прямой», «прямая проходит через точку», «точка принадлежит прямой».

В отличие от известных подходов, при которых для идентификации знаний отношения между понятиями предметной области пытаются выявить на основе семантического анализа текста с участием экспертов, идентификацию знаний, содержащихся в тексте, осуществим установлением отношений между его словами по результатам синтаксического анализа текста.

Таким образом, под идентификацией знаний будем понимать построение семантической сети текста на основе его синтаксического анализа. Основное положение такого подхода состоит в том, что синтаксическая сеть текста, построенная по результатам синтаксического анализа, является подсетью его семантической сети. В этом случае предполагается, что взаимосвязи понятий, полученные в результате синтаксического анализа текста в обязательном порядке должны допускаться и его семантической сетью.

## **6. Синтаксис предложений**

Простое предложение русского языка имеет предикативную структуру и может быть представлено грамматическим предикатом, аргументами которого являются грамматический субъект и грамматический объект.

Обычно подлежащее выражает грамматический объект, сказуемое – грамматический предикат, а дополнение – грамматический субъект. В свою очередь сложное предложение состоит из простых и имеет в своем составе две или несколько предикативных единиц, образующих в смысловом, конструктивном и интонационном отношении единое целое [8].

Обычно простое предложение русского языка представляют в виде дерева, где каждая дуга идет от главного слова к зависимому слову и имеет имя синтаксического отношения [22, 38]. Для упрощения представления предложений сильно связанные слова объ-

единяют в синтаксические группы. В этом случае один из членов группы (слово) всегда выступает в роли представителя группы и подчиняет остальные ее члены. Процесс построения такого дерева называют синтаксическим анализом.

Процесс выделения в предложении синтаксических групп слов будем называть синтаксическим разбором предложения, а синтаксический анализ предложения определим как сопоставление содержащихся в нем групп слов предикативной структуре.

На рис. 2 представлен пример синтаксического разбора и анализа предложения «Перпендикулярные прямые образуют прямой угол».

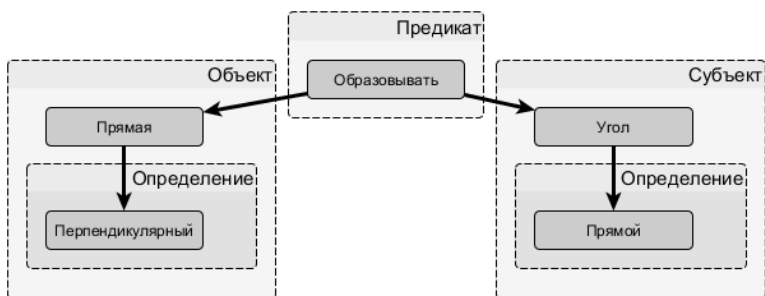


Рис. 2. Пример синтаксического разбора и анализа

В вершине дерева, полученного после синтаксического анализа простого предложения, всегда стоит грамматический предикат. Группа грамматического предиката является главной в предложении и подчиняет группы грамматического объекта и грамматического субъекта. В отличие от группы грамматического предиката, наличие групп грамматического объекта и грамматического субъекта является не обязательным.

Каждая из главных синтаксических групп слов может содержать в себе другие группы слов. Например, существуют группы определения, количественные, обстоятельственные, длительные, сочинительные, служебные и т.д. Как правило, деление на группы зависит от конкретной реализации синтаксического анализатора.

Будем предполагать, что грамматический объект и грамматический субъект предложения описывают понятия предметной области, а грамматический предикат – связь между ними. Под понятием будем понимать главное слово грамматической группы объекта или субъекта дополненное имеющимися определениями. Например, понятия «Треугольник», «Равнобедренный треугольник», «Равнобедренный прямоугольный треугольник» являются разными понятиями. Под предикатом будем понимать главное слово, входящее в группу предиката.

Иногда в тексте встречаются предложения, не имеющие объекта или субъекта. В таком случае для установления связи между объектом и субъектом вводится «пустое» понятие. Например, в предложении «Существует несколько типов фигур» присутствует объект, выраженный понятием «Типы фигур», но отсутствует субъект. Поэтому, понятие «Типы фигур» связывается с «пустым» понятием отношением «Существовать»

Таким образом, с помощью синтаксического анализа простого предложения можно выделить одно суждение, которое сообщает о взаимосвязанных понятиях и о характере их взаимосвязи.

Однако для идентификации знаний, содержащихся в тексте, требуется учет всех суждений. Объединение суждений осуществим на основе представления текста в виде семантической сети.

## **7. Семантическая сеть**

В результате синтаксического анализа предложения может быть получена его семантическая сеть (мультиграф), состоящая из узлов (вершин), помеченных именами грамматических субъектов и объектов, и дуг, задающих отношения между ними и помеченных именами грамматических предикатов. Так как текст состоит из множества предложений, то объединим семантические сети этих предложений в единую семантическую сеть.

Пусть заданы две семантические сети: сеть текста  $S$  и сеть простого предложения  $S'$ . Сеть текста  $S$  зададим в виде упорядоченного множества из трех элементов:

$$(1) \quad S = (N, E, P),$$

где  $N = \{n_i | i = 1, \dots, Q\}$  – множество узлов сети с числом элементов  $Q$ ;  $E = \{(n_i, n_j, p_k) | n_i, n_j \in N; p_k \in P\}$  – множество ее дуг;  $P$  – множество двуместных предикатов. Дуги заданы упорядоченными множествами из трех элементов  $(n_i, n_j, p_k) \in N \times N \times P$ , где  $n_i \in N$  – начальный узел,  $n_j \in N$  – конечный узел,  $p_k \in P$  – имя дуги, а  $\times$  – знак операции декартового произведения множеств.

В свою очередь сеть предложения  $S'$  простая и состоит из двух узлов  $n_1, n_2$  и одной дуги, помеченной именем некоторого предиката  $p$ :

$$S' = (N', E', P'), \quad N' = \{n_1, n_2\}, \quad E' = \{(n_1, n_2, p)\}.$$

Тогда объединением сетей  $S = (N, E, P)$  и  $S' = (N', E', P')$  будет сеть  $S'' = S \cup S'$  такая, что  $S'' = (N'', E'', P'')$  и  $N'' = N \cup N'$ ,  $E'' = E \cup E'$ ,  $P'' = P \cup P'$ .

Аналогично можно определить пересечение сетей. Пересечением сетей  $S' = (N', E', P')$  и  $S'' = (N'', E'', P'')$  будет сеть  $S = S' \cap S''$  такая, что  $S = (N, E, P)$  и  $N = N' \cap N''$ ,  $E = E' \cap E''$ ,  $P = P' \cap P''$ .

В свою очередь разностью сетей  $S' = (N', E', P')$  и  $S'' = (N'', E'', P'')$  называется сеть  $S = S' \setminus S''$  такая, что  $S = (N, E, P)$  и  $N = N' \setminus N''$ ,  $E = E' \setminus E''$ ,  $P = P' \setminus P''$ .

Для упрощения семантические сети будем изображать в виде взвешенного ориентированного мультиграфа. В этом случае вместо имен грамматических предикатов будем указывать кратности дуг, равные числу различных предикатов, связывающих соответствующие узлы. Так как исследуются не статистические свойства текста, а знания, этим текстом выражаемые, то при задании кратности дуг не будем учитывать частоту повторения одного и того же предиката. В итоге имеем, что кратность дуги между двумя узлами сети равна числу различных грамматических предикатов, связывающих соответствующие слова-понятия.

На рис. 3 показан фрагмент семантической сети, полученный в результате синтаксического анализа параграфа «Основ-

ные свойства геометрических фигур» учебника по геометрии [26]. Семантическая сеть содержит 90 понятий анализируемой предметной области и 215 отношений, заданных на них.

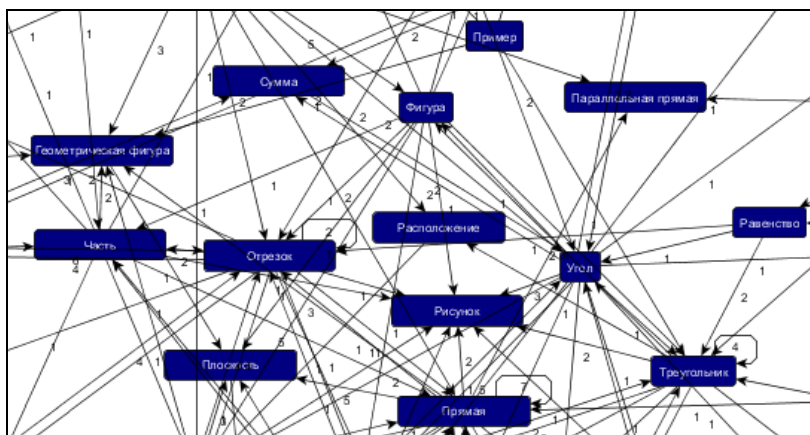


Рис. 3. Фрагмент семантической сети «Планиметрия»

Сеть была получена в результате выполнения следующих действий:

- поиска понятий, выраженных однословными и многословными терминами [6];
- установления синтаксических отношений между выявленными понятиями;
- разыменования найденных референтных связей.

Построенная семантическая сеть оказалась связным графом, у которого любой узел имеет как минимум один путь, связывающий его с любым другим узлом.

## 8. Семантическое расстояние

Два текста выражают близкие знания, если пересечение их семантических сетей соизмеримо с их объединением. В то же время два текста выражают разные знания, если пересечение семантических сетей мало по сравнению с их объединением.

Для количественной оценки близости текстологических знаний необходимо уметь определять расстояние между семантическими сетями и узлами одной семантической сети.

Известны два основных подхода для измерения семантических расстояний между словами: парадигматический и синтагматический [21]. Парадигматический подход базируется на измерении семантических расстояний в лексиконе языка, где лексикон определяется как набор классов слов, связанных парадигматическими связями, а под парадигматической связью понимается отношение между словами, имеющих общностью значений. Парадигматические отношения определяют онтологические свойства языка в целом и отражают те связи, которые существуют между выражаемыми ими явлениями действительности безотносительно какой-либо предметной области.

Синтагматический подход основан на измерении семантических расстояний между словами и текстами на основе статистических методов. При этом выделяются две группы методов: статистические и логико-статистические. К статистическим методам относятся методы, основанные на модели «ранг–частота» и описываемые законами Ципфа, Мандельброта и Бредфорда. Эти законы выражают динамическую зависимость частоты слова в тексте от его ранга, где ранг слова – порядковый номер слова в частотном словаре языка.

К логико-статистическим методам относятся дистрибутивно-статистический метод, метод гипертекстовой ссылки, частотно-семантический метод и метод компонентного анализа. Дистрибутивно-статистический метод позволяет получать количественную характеристику связанности слов в тексте на основе вычисления некоторой заранее заданной формулы, зависящей от статистических характеристик слов в этом тексте. Метод гипертекстовой ссылки устанавливает связь между понятиями-словами на основе общих слов в определении этих понятий, а частотно-семантический метод дополнительно учитывает и их частоту. В свою очередь метод компонентного анализа связывает понятия-слова путем разложения их значений на минимальные семантические составляющие – семы. Компонентный анализ основан на гипотезе о том, что значение всякой языковой



единицы состоит из сем и словарный состав языка может быть описан с помощью ограниченного их числа.

Первая мера семантической близости понятий-концептов была создана для оценки близости узлов в таксономиях [2], являющихся частным случаем семантической сети. Мера близости  $sim$  двух узлов  $n_1$  и  $n_2$  в таксономии представляет собой обратное значение длины кратчайшего пути между этими узлами  $d(n_1, n_2)$ :

$$sim(n_1, n_2) = \frac{1}{d(n_1, n_2)}.$$

В [35] предложена нормированная мера близости, которая определяется через логарифм отношения кратчайшего пути в таксономии между узлами  $n_1$  и  $n_2$  к ее удвоенному диаметру:

$$sim(n_1, n_2) = -\log \frac{d(n_1, n_2)}{2D},$$

где  $D$  – диаметр таксономии, или максимальное расстояние между ее узлами.

В другом типе мер используются семантические сети, построенные на базе определений понятий. В этом случае семантическая связь двух понятий-слов  $n_1$  и  $n_2$  прямо пропорциональна числу понятий-слов, входящих в определение первого и второго понятия:

$$sim(n_1, n_2) = |gloss(n_1) \cap gloss(n_2)|,$$

где  $gloss(n)$  – множество понятий-слов в определении понятия-слова  $n$ .

В ряде случаев оказывается, что в пересечении определений сравниваемых понятий-слов может не оказаться ни одного общего понятия. Поэтому в [36] учитываются не только понятия-слова, которые учувствуют в определении каждого понятия, но и понятия-слова, которые связывают эти понятия в семантической сети текста.

Рассмотренные выше методы определения семантического расстояния между понятиями опираются на определенные типы отношений, характерные для таксономий. Выявление таких отношений в тексте является нетривиальной задачей, требую-

щей, в конечном итоге, привлечения экспертов предметной области [23].

Для рассматриваемого класса задач семантическое расстояние между понятиями определим иным образом. Пусть задана семантическая сеть  $S$ . Зафиксируем два произвольных ее узла  $n_i$  и  $n_j$ . Найдем  $R(n_i, n_j)$  – множество путей без циклов (цепей) длины не более чем  $M$ , ведущих от узла  $n_i$  к узлу  $n_j$ . Тогда семантическое расстояние  $L$  между узлами  $n_i$  и  $n_j$  может быть вычислено по формуле:

$$(2) \quad L(n_i, n_j) = \sum_{r \in R(n_i, n_j)} \frac{\min(w_1^r, w_2^r, \dots, w_{d(r)}^r)}{d(r)},$$

где  $d(r)$  – длина пути  $r$ ,  $d(r) \leq M$ ;  $M$  – глубина связи;  $w_i^r$  – вес дуги  $i$  пути  $r$ ,  $i = 1, 2, \dots, d(r)$ ;  $\min$  – функция, возвращающая минимальное значение ее аргументов.

Из формулы (2) следует, что два узла отдалены друг от друга, если между ними имеется много путей (понятия слабо связаны). Отдаленность двух узлов тем больше, чем больше веса соединяющих их дуг (более вариативными являются связи между понятиями). Однако если в пути встречается дуга с небольшим весом, то этот путь вносит меньший вклад в удаленность узлов друг от друга. Но не все пути учитываются при подсчете расстояния между узлами: исключаются те пути, длина которых больше заданной глубины связи (трудно установить связь между понятиями, так как это требует использования большого числа предложений).

Следует обратить внимание на то, что семантическое расстояние (2) не является метрикой, так как для него не выполняются аксиомы тождества, симметрии и неравенства треугольника. Это связано с тем, что понятие может иметь отношение к самому себе, связи между двумя понятиями по определению не симметричны и близость двух понятий зависит не только от непосредственно связывающих их предикатов, но и от предикатов, задающих косвенную связь через другие понятия.

Два понятия, соединенные длинным путем, признаются слабо связанными. Поэтому при расчете семантических расстояний задается глубина учитываемых связей  $M$ . Для многих

практических применений  $M$  можно выбирать из диапазона от двух до семи. Стандартная интерпретация  $M$  – число суждений, которыми одновременно может оперировать обучающийся, или максимальное число суждений, встречающихся в его умозаключениях.

Таким образом, единицей измерения семантических расстояний является грамматический предикат, который может использоваться для выражения одного суждения. Следует заметить, что в дидактических исследованиях суждение также признается основной единицей измерения объема знаний [20].

Если два узла сети не связаны ни одним путем, то вычисление семантического расстояния между ними дает величину, равную нулю. Нулевое семантическое расстояние обозначает отсутствие связи между соответствующими понятиями и утверждает их содержательную неразличимость. С другой стороны, чем больше величина семантического расстояния между узлами сети, тем более отдаленными являются соответствующие понятия по содержанию.

Показательно значение семантического расстояния  $L(n, n)$  между одним и тем же узлом  $n$ . Если  $L(n, n)$  равно нулю, то соответствующее понятие может быть признано простым. Если величина  $L(n, n)$  большая, то соответствующее понятие является сложным и может быть признано как не раскрытое по содержанию.

## **9. Измерение знаний**

Помимо семантического расстояния между узлами сети для оценки трудности и сложности учебных задач требуется вычисление семантического расстояния между семантическими сетями и определение объема знаний, в них содержащихся.

Измерение объемов знаний до сих пор осуществляется методами, основанными на экспертных оценках результатов учебной работы обучающихся (субъективные методы) и на тестировании обучающихся (объективные методы). Теоретический фундамент этих методов заложен в современной теории педагогических измерений [1], где процесс обучения рассматривается как постоянное преодоление обучающимся грани между до-

ступной областью знаний (уровнем актуального развития) и потенциально доступной (зоной ближайшего развития). Задача педагогов состоит в том, чтобы подобрать трудные, но посильные задания, способствующие выявлению уровня актуального развития [13].

Известен также подход, согласно которому измерение знаний осуществляется на основе измерения емкости понятий, где под емкостью понятия понимается число связей этого понятия с другими понятиями, а сама единичная связь выступает в качестве единицы измерения [15]. В этом случае измерение объема знаний в тексте, теме, учебной дисциплине сводится к выявлению понятий предметной области и подсчету числа связей между ними экспертными методами.

Для определения близости двух семантических сетей используется поиск гомоморфизмов, преобразующего одну сеть в другую. Однако нахождение гомоморфизма позволяет определить только качественную «похожесть» сетей и не позволяет измерить объемы знаний, содержащихся в этих сетях.

Очевидно, что перечисленные методы непригодны для определения объема знаний в семантической сети текста, полученной на основе синтаксического анализа, так как в одном случае требуется привлечение экспертов (экспертная оценка, тестирование, подсчет емкости понятий), а в другом – отсутствует эффективно вычисляемое расстояние между семантическими сетями (поиск гомоморфизмов).

Под объемом знаний, содержащихся в семантической сети  $S = (N, E, P)$ , будем понимать величину, вычисляемую по следующей формуле:

$$(3) \quad K(S) = \sum_{n_i, n_j \in N} L(n_i, n_j),$$

где  $K(S)$  – объем знаний в семантической сети  $S$ , а  $L(n_i, n_j)$  – семантическое расстояние между узлами  $n_i$  и  $n_j$ , вычисляемое по формуле (2).

Формула (3) утверждает, что объем знаний в сети  $S$  есть сумма семантических расстояний между всеми парами ее узлов.

Как и у семантического расстояния, единицей измерения объема знаний является грамматический предикат.

**Теорема 1.** Объем знаний (3) является аддитивной мерой на множестве семантических сетей.

Для доказательства теоремы 1 сначала покажем, что мера пустой сети равна нулю. Действительно, если семантическая сеть  $S$  пуста,  $S = (\emptyset, \emptyset, \emptyset)$ , то из формул (3) и (2) непосредственно следует  $K(S) = 0$ . Также из формул (3) и (2) следует утверждение о том, что мера объединения двух сетей  $S_1$  и  $S_2$  таких, что  $S_1 \cap S_2 = (\emptyset, \emptyset, \emptyset)$ , равна сумме их мер:  $K(S_1 \cup S_2) = K(S_1) + K(S_2)$ . ♦

Таким образом, в отличие от других известных подходов, формула (3) позволяет объективно измерить объем знаний, содержащийся в произвольном тексте.

Известны также несколько подходов к определению расстояний между графами. Это использование высоты ориентированного графа, которая равна наибольшей длине пути от корня к листу в ярусно-параллельной форме его представления [30]. Также используется расстояние, получаемое на основе вычисления диаметра графа – максимального числа ребер, связывающих две его вершины [11]. Известно также расстояние между графами, получаемое путем вычисления реберной плотности – числовой величины, характеризующей близость графа к полностью связному [14].

Очевидно, что перечисленные подходы непригодны для определения расстояний между семантическими сетями. Семантическое расстояние между сетями  $S_1$  и  $S_2$  определим как объем знаний, содержащийся в симметрической разности этих сетей:

$$(4) \quad D(S_1, S_2) = K(S_1 \setminus S_2 \cup S_2 \setminus S_1).$$

**Теорема 2.** Семантическое расстояние (4) является метрикой на множестве семантических сетей.

Для доказательства теоремы 2 достаточно показать, что на множестве семантических сетей удовлетворяются аксиомы тождества, симметрии и треугольника. Пусть  $S_1$  и  $S_2$  – семантические сети. Если  $S_1 = S_2$ , то из (4) следует  $D(S_1, S_2) = 0$ . Теперь пусть  $D(S_1, S_2) = 0$ . Тогда из (4) следует, что  $S_1 = S_2$ . В итоге  $D(S_1, S_2) = 0$  тогда и только тогда, когда  $S_1 = S_2$ . Аксиома тождества доказана. Аксиома симметрии также непосредственно

следует из (4):  $D(S_1, S_2) = D(S_2, S_1)$ . В свою очередь аксиома треугольника следует из формулы (4) и теоремы 1:

$$K(S_1 \setminus S_2 \cup S_2 \setminus S_1) + K(S_2 \setminus S_3 \cup S_3 \setminus S_2) \geq K(S_1 \setminus S_3 \cup S_3 \setminus S_1). \blacklozenge$$

Таким образом, множество семантических сетей текстов является метрическим пространством, а семантическое расстояние между двумя сетями равно суммарному объему знаний, в них содержащихся.

## 10. Оценка знаний

Оценка знаний предполагает сопоставление имеющихся знаний у обучающегося с эталонными. В нашем случае эталонными знаниями являются знания о предметной области, а знания обучающегося определяются по решенным им задачам. При успешном решении учебных задач обучающийся показывает приобретенные им знания.

Рассмотрим предлагаемый в настоящей статье подход для оценки объемов знаний, а также трудности и сложности учебных задач. Пусть имеются следующие семантические сети:

- $S$  – семантическая сеть предметной области, полученная путем синтаксического анализа текстов, описывающих эту предметную область;
- $T$  – семантическая сеть учебной задачи, полученная путем синтаксического анализа ее текста;
- $O$  – семантическая сеть обучающегося, полученная путем последовательного объединения семантических сетей задач, успешно решенных обучающимся.

Результат сопоставления сети предметной области  $S$  и сети текущей задачи  $T$  определяет сложность этой задачи (объективная характеристика задачи), а сопоставление сети текущей задачи  $T$  и сети обучающегося  $O$  – трудность задачи (субъективная характеристика задачи). В свою очередь сопоставление сети предметной области  $S$  и сети обучающегося  $O$  позволяет определить объем еще не усвоенных им знаний (рис. 4).

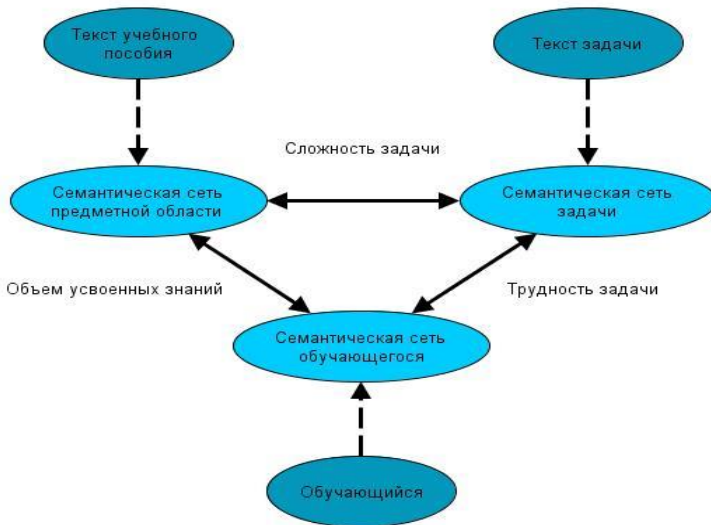


Рис. 4. Семантические характеристики

Учитывая специфику решаемой задачи, можно показать, что сети  $S$ ,  $T$  и  $O$  согласованы, т.е.  $T \subseteq S$ ,  $O \subseteq S$ , где отношение включения сетей  $\subseteq$  определяется так: если  $S' = (N', E', P')$ ,  $S'' = (N'', E'', P'')$  и  $S' \subseteq S''$ , то  $N' \subseteq N''$ ,  $E' \subseteq E''$  и  $P' \subseteq P''$ .

В итоге имеем следующие формулы, позволяющие вычислить сложность и трудность учебной задачи  $T$ , а также объем еще не усвоенных знаний:

$$(5) \quad U(O) = K(S \setminus O), \quad u(O) = K(S \setminus O) / K(S);$$

$$(6) \quad C(T) = K(T \cap S), \quad c(T) = K(T \cap S) / K(S);$$

$$(7) \quad H(T) = K(T \setminus O), \quad h(T) = K(T \setminus O) / K(O);$$

$$(8) \quad \bar{H}(T) = K(T), \quad \bar{h}(T) = K(T) / K(O).$$

Объем не усвоенных знаний  $U(O)$  и относительный объем не усвоенных знаний  $u(O)$  вычисляются по формуле (5) на основе объемов знаний, содержащиеся в семантической сети предметной области  $S$  и семантической сети обучающегося  $O$ .

Сложность  $C$  учебной задачи  $T$  определяется по формуле (6) и равна объему знаний из семантической сети предметной

области  $S$ , содержащейся в семантической сети задачи  $T$ . Относительная сложность задачи  $c$  – это доля знаний предметной области, содержащихся в задаче  $T$ .

Трудность  $H$  учебной задачи  $T$  определяется по формуле (7) как объем новых знаний, содержащийся в семантической сети задачи  $T$  относительно семантической сети обучающегося  $O$ . В свою очередь относительная трудность задачи  $h$  – это отношение объема новых знаний в задаче  $T$  к знаниям, имеющимся у обучающегося.

Помимо трудности учебной задачи  $T$ , связанной с наличием в ней новых знаний, можно ввести в использование интегральные трудности учебной задачи  $\bar{H}$  и  $\bar{h}$  (8), учитывающие общий объем знаний в задаче. Интегральные трудности позволяют учесть число шагов решения (число суждений), которые выполнит обучающийся, чтобы проследить связи между всеми понятиями задачи.

Рассмотрим теперь построение описанных выше семантических сетей в процессе обучения. Как правило, курс обучения разбивается на части (разделы). После каждой части происходит проверка знаний и умений, которая реализуется в виде решения соответствующих задач и их проверки (рис. 5).

Первый этап – построение семантической сети предметной области  $S$  по текущей части учебного материала. Второй этап – решение обучающимся контрольных задач и их проверка. При этом могут использоваться различные стратегии выбора контрольных задач, например, в порядке увеличения их трудностей или сложностей. После того как учебный материал усвоен обучающимся (объем не усвоенных знаний равен нулю или относительно мал), происходит построение семантической сети предметной области для новой части учебного материала. При этом сеть не строится заново, а достраивается.



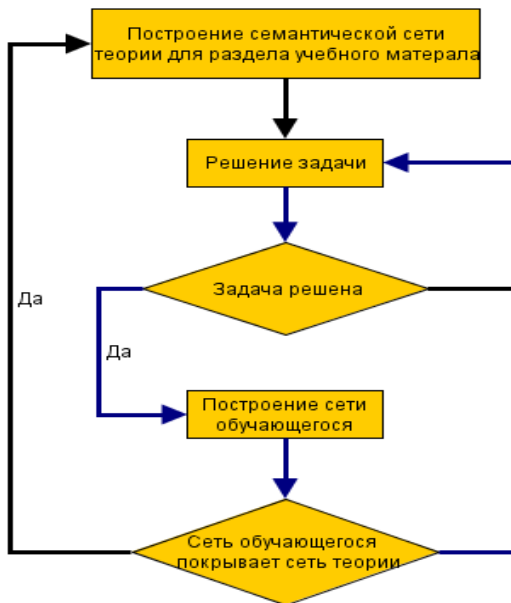


Рис. 5. Процесс обучения

## 11. Демонстрационный пример

Рассмотрим описанный выше метод оценки знаний на примере. Пусть имеется текст задачи: «На стороне  $AB$  треугольника  $ABC$  взята точка  $D$ . Чему равна сторона  $AB$  треугольника, если сторона  $AD$  равна 5 см, а сторона  $BD$  – 6 см?».

В данной задаче имеются три понятия и два отношения, одно из которых встречается дважды. На рис. 6 и 7 представлена сеть задачи, а также фрагменты сети обучающегося и сети предметной области. Фрагмент сети предметной области включает в себя все понятий сети задачи. Заметим, что из сети обучающегося следует, что обучающийся не знает, как соотносятся понятия «Сторона» и «Точка».

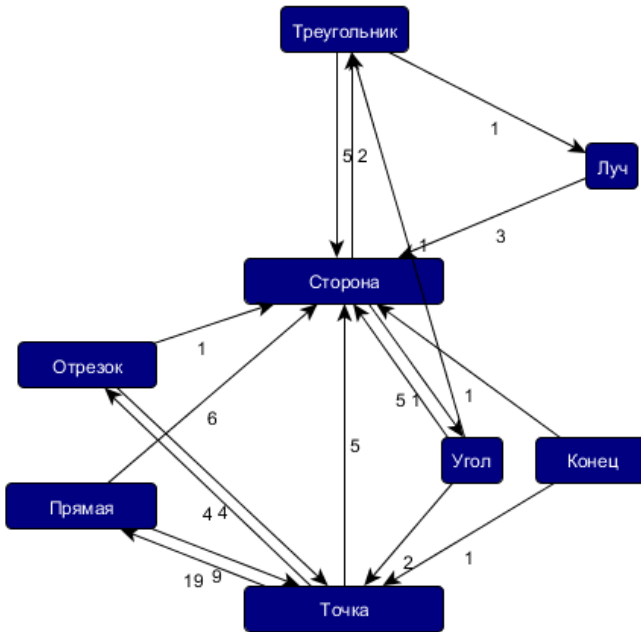


Рис. 6. Семантическая сеть предметной области  $S$

Предварительно покажем, как производится вычисление семантических расстояний между понятиями. Для этого рассмотрим понятия «Точка» и «Сторона» в семантической сети предметной области  $S$ . Для упрощения вычислений зададим глубину прослеживаемых связей  $M$ , равную двум. Запишем множество путей  $R(\text{Точка}, \text{Сторона})$ , соединяющих выбранные узлы:  $\{(\text{Точка}, \text{Сторона}), (\text{Точка}, \text{Прямая}, \text{Сторона}), (\text{Точка}, \text{Отрезок}, \text{Сторона})\}$ . Тогда по формуле (2) находим

$$L(\text{Точка}, \text{Сторона}) = \frac{\min(5)}{1} + \frac{\min(19, 6)}{2} + \frac{\min(4, 1)}{2} = 8,5.$$

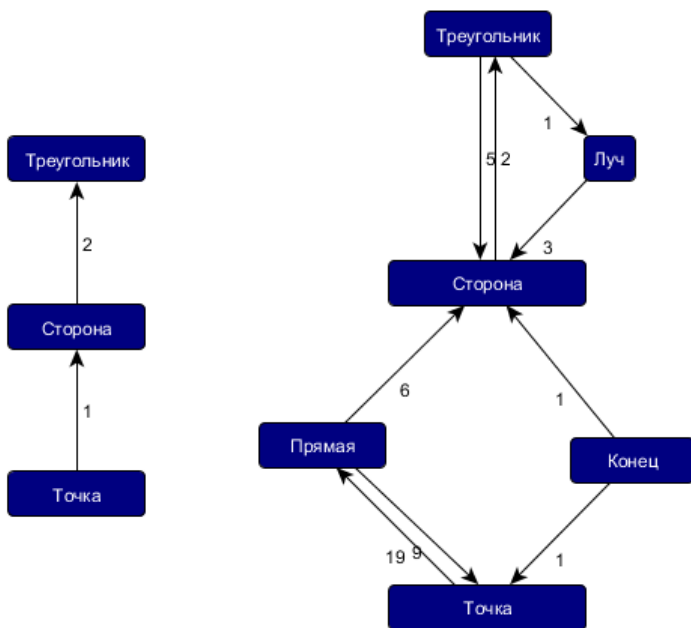


Рис. 7. Семантическая сеть задачи  $T$  и обучающегося  $O$

Полученный результат может быть проинтерпретирован так: понятие «Точка» связано с понятием «Сторона» 8,5 различными предикатами. В свою очередь семантическое расстояние между понятием «Сторона» и «Точка» равно другому значению:  $L(\text{Сторона}, \text{Точка}) = 0,5$ .

Вычисление объемов знаний покажем на примере определения трудности  $H(T)$  учебной задачи  $T$ . Объем новых знаний, содержащийся в семантической сети задачи  $T$  относительно семантической сети обучающегося  $O$ , определяется семантической сетью  $TO$ , которая в рассматриваемом примере состоит из узлов «Сторона» и «Точка» и дуги, их соединяющей. Объем знаний, содержащийся в этой сети, равен единице. Следовательно, трудность задачи  $H(T)$  также равна единице. Полученная величина  $H(T)$  определяет объем знаний, который получит обучающийся, правильно решив задачу  $T$ .

## **12. Вычислительный эксперимент**

Для проведения вычислительного эксперимента в качестве синтаксического анализатора был выбран лингвистический процессор ЭТАП-3, разработанный в Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН [22]. По сравнению с другими анализаторами синтаксический анализатор ЭТАП-3 обладает рядом преимуществ: имеется общедоступный сервис для автоматического синтаксического анализа текстов, результаты анализа пересылаются в xml-формате (UNL), выполняется синтаксический анализ предложений без ограничения сложности.

С помощью ЭТАП-3 был произведен синтаксический анализ двух глав предметной области «Планиметрия»: «Основные свойства простейших геометрических фигур» и «Геометрические построения». Каждая глава разделена на три части: предметная область, вопросы и задачи. Например, в результате синтаксического анализа главы «Геометрические построения» найдено 242 понятий-слов и 817 отношений между ними.

Для проведения вычислительного эксперимента разработана программа (рис. 8), которая позволяет загружать файлы с результатами синтаксического анализа в формате UNL и формировать из них семантические сети. Для работы с семантическими сетями в программе реализованы следующие инструменты:

- добавление, удаление, объединение семантических сетей;
- перемещение семантической сети в разные группы (предметная область, решенные задачи, нерешенные задачи);
- просмотр статистических данных семантических сетей (частота слов и отношений, части речи);
- просмотр семантических сетей в графическом режиме.

На примере главы «Геометрические построения» смоделирован процесс решения и оценки задач. За базовую сеть обучающегося была взята сеть, составленная на основе семантических сетей вопросов, т.е. было предположено, что обучающийся ответил на все вопросы и ему предстоит решить 30 задач.

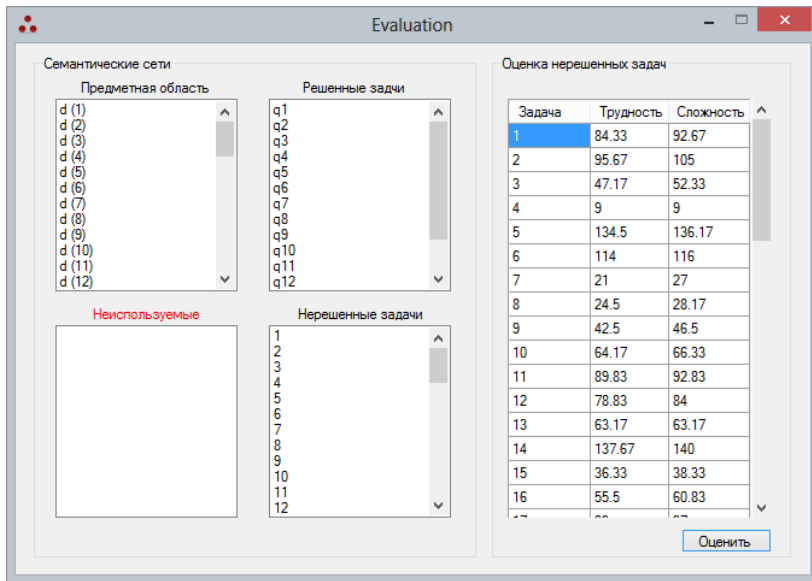


Рис. 8. Интерфейс программы

На рис. 9 показаны графики пошагового изменения трудности задач в процессе их решения. На каждом шаге для решения выбиралась задача с наименьшей трудностью. После выбора задачи ее семантическая сеть добавляется в семантическую сеть обучающегося, что вызывало уменьшение трудности остальных задач на следующих шагах обучения.

Из рис. 9 также видно, что решение задач с небольшой трудностью несущественно влияет на изменение трудностей остальных задач на следующих шагах обучения. Однако при выборе для решения более сложных задач наблюдается существенное уменьшение трудности еще не решенных задач.

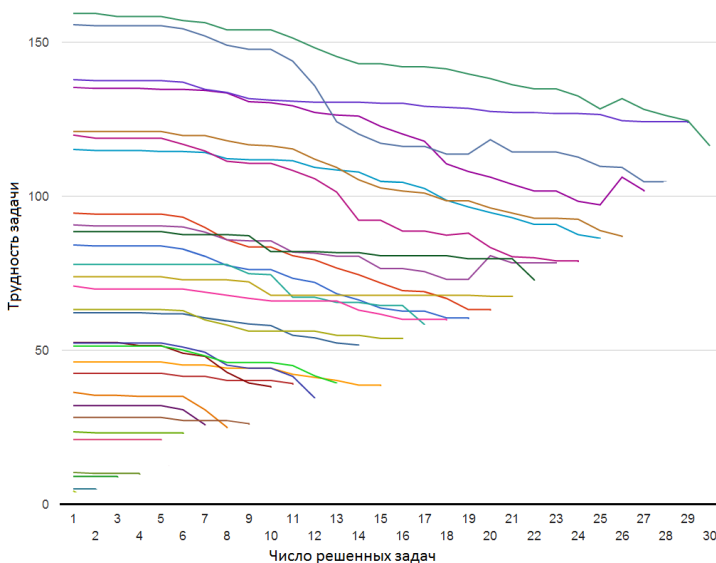


Рис. 9. Изменения трудности задач в процессе решения

### 13. Заключение

Оценка сложности и трудности учебных задач является одной из ключевых проблем в области автоматизации обучения. В данной работе было предложено решение этой задачи на основе синтаксического анализа текстов, направленного на выявление предикативной структуры составляющих его предложения, и построения по результатам этого анализа семантических сетей текстов.

Для оценки объемов знаний, содержащихся в семантических сетях, разработан математический аппарат, базирующийся на определении семантических расстояний между понятиями-словами, которые выявлены в процессе автоматического синтаксического анализа.

Показано, что объем знаний, содержащихся в семантической сети, является мерой на множестве семантических сетей, а

введенное расстояние между семантическими сетями превращает множество семантических сетей в метрическое пространство.

В отличие от других существующих методов определения объемов знаний, основанных на использовании онтологий и тезаурусов, разработанный метод отличается универсальностью применения, так как не привязан к конкретной предметной области и не требует привлечения экспертов для первичного ее описания. Основное условие применимости метода – предоставление описаний предметной области в виде множества текстов на естественном языке и наличие алгоритма, выявляющего предикативную структуру предложений.

Как и в теории информации Шеннона–Хартли [34, 37], в представленном методе измерения объемов знаний выполнено абстрагирование от психической природы изучаемых явлений и найден такой материальный объект, по характеристикам которого можно судить об интенсивности моделируемых психических процессов.

Так, в теории информации – это вероятность сообщения, или частота его предъявления испытуемому: чем более часто появляется некоторое сообщение, тем оно менее «неожиданно» для испытуемого и, как следствие этого, воспринимается им как содержащее меньший объем информации. Для учета особенностей восприятия сообщений объем информации в сообщении определен как отрицательный логарифм от его вероятности.

В разработанном методе измерения объемов знаний – это текст, предъявляемый испытуемому как множество предложений, имеющих предикативную структуру, и воспринимаемый им как содержащий некоторые знания: чем больше понятий и связывающих их предикатов содержится в тексте, тем больший объем знаний может быть воспринят из этого текста. Для учета активной природы знаний глубина прослеживаемых связей при подсчете объема знаний ограничена способностью испытуемого устанавливать мысленные связи между понятиями путем выполнения умозаключений с определенным числом исходных суждений в них.

## Литература

1. АВАНЕСОВ В.С. *Знания как предмет педагогического измерения* // Педагогические измерения. – 2005. – №3. – С. 43–52.
2. АНИСИМОВ А.В., ЛИМАН К.С., МАРЧЕНКО А.А. *Методы вычисления мер семантической близости слов естественного языка*. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://lingvoworks.org.ua> (дата обращения: 09.04.2013).
3. БАБАНСКИЙ Ю.К. *Оптимизация процесса обучения: Общедедактический аспект*. – М.: Педагогика, 1997. – 256 с. – С. 16–23.
4. БАЛЛ Г.А. *Теория учебных задач: психолого-педагогический аспект*. – М.: Педагогика, 1990. – 184 с.
5. БЕЛОНОГОВ Г.Г. *Компьютерная лингвистика и перспективные информационные технологии* // Русский мир. – 2004. – 248 с.
6. БРАСЛАВСКИЙ П.И., СОКОЛОВ Е.А. *Сравнение пяти методов извлечения терминов произвольной длины* // Труды международной конференции «Диалог 2008». – 2008. – С. 67–74.
7. ВАГИН В.Н., ГОЛОВИНА Е.Ю., ЗАГОРЯНСКАЯ А.А., ФОМИНА М.В. *Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах*. – М.: Физматлит, 2008. – 712 с.
8. ВАЛГИНА Н.С., РОЗЕНТАЛЬ Д.Э., ФОМИНА М.И. *Современный русский язык: Учебник* / Под ред. Н.С. Валгиной. – М.: Логос, 2002. – 528 с.
9. ГАВРИЛОВА Т.А., ХОРОШЕВСКИЙ В.Ф. *Базы знаний интеллектуальных систем*. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
10. ДАНИЛЬЯН О.Г., ПАНОВА Н.И. *Современный словарь по общественным наукам*. – М.: Эксмо-Пресс, 2007. – 528 с.
11. ЕВСТИГНЕЕВ В.А. *Применение теории графов в программировании*. – М.: Наука, 1985. – 332 с.
12. ЕРМАКОВ А.Е. *Извлечение знаний из текста и их обработка: состояние и перспективы* // Информационные технологии. – 2009. – № 7. – С. 50–55.



13. ЕФРЕМОВА Н.Ф. *Тестовый контроль в образовании: Учебное пособие*. – М.: Университетская книги, 2007. – 540 с.
14. КАРПЕНКО А.П., СОКОЛОВ Н.К. *Меры сложности семантической сети в обучающей системе* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Приборостроение». – 2009. – №1(74). – С. 50–66.
15. КАРПЕНКО М.П. *Проблема измерения знаний и образовательные технологии* // Журнал практического психолога. – 1997. – №4. – С. 74–79.
16. КРАВЦОВ Л.Г. *Методологические проблемы психологического анализа мышления в понятиях* // Мат. I Рос. конф. по когнитивной науке. Казань, Казанский гос. ун-т, 2004. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ksu.ru/ss/cogsci04/science/cogsci04/sod.php3> (дата обращения: 22.11.2013).
17. КРАСНЫХ В.В. *Основы психолингвистики и теории коммуникации*. – М.: Гносис, 2012. – 333 с.
18. ЛЕРНЕР И.Я. *Факторы сложности познавательных задач* // Новые исследования в педагогических науках. – 1970. – №1. – С. 86–91.
19. ЛЮГЕР Д.Ф. *Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем*. – М.: Вильямс, 2005. – 864 с.
20. МИКК Я.А. *Оптимизация сложности учебного текста: В помощь авторам и редакторам*. – М.: Просвещение, 1981. – 33 с.
21. МИТРОФАНОВА О.А. *Семантические расстояния: проблемы и перспективы* // XXXIV Международная филологическая конференция: Вып. 21. Прикладная и математическая лингвистика. – СПб., 2005. – С. 59–63.
22. *Многоцелевой лингвистический процессор ЭТАП-3*. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.iitp.ru/ru/science/> (дата обращения: 09.04.2013).
23. НАЙХАНОВА Л.В. *Технология создания методов автоматического построения онтологий с применением генетического и автоматного программирования*. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. – 237 с.

24. *Новая философская энциклопедия*: В 4-х т. / Ин-т философии РАН; Нац. обществ.-науч. фонд; Предс. научно-ред. совета В.С. Степин. – М.: Мысль, 2010. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://iph.ras.ru/enc.htm> (дата обращения: 09.04.2013).
25. *Новейший философский словарь*: 3-е изд., исправл. – Мн.: Книжный Дом, 2003. – 1280 с.
26. ПОГОРЕЛОВ А.В. *Геометрия: Учебник для 7–11 классов общеобразовательных учреждений*. – М.: Просвещение, 1995. – 383 с.
27. ПОПОВ Э.В. *Общение с ЭВМ на естественном языке*. – М.: Наука, 1982. – 360 с.
28. РОМАДИНА О.Г., РАКИТИНА Н.И. *Методика оценки сложности учебных задач по информатике // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. – 2010. – №10–12(31). – С. 146–151.
29. РЫЖЕНКО Н.Г. *Графовое моделирование как средство определения сложности решений текстовых задач школьного курса математики // Математика и информатика: Наука и образование. Вып. 1*. – Омск: Изд-во ОмГПУ, 2001. – С. 99–103.
30. ФЕДОТОВ И.Е. *Некоторые приемы параллельного программирования: Учебное пособие*. – М.: Изд-во МГИРЭА, 2008. – 188 с.
31. ФИЛИППОВИЧ Ю.Н., ПРОХОРОВ А.В. *Семантика информационных технологий: опыты словарно-тезаурусного описания*. – М.: МГУП, 2002. – 368 с.
32. COLLINS-TOMPSON K., BENNETT P., WHITE R., CHICA S., SONTAG D. *Personalizing web search results by reading level // Proc. 20th ACM international conference on Information and knowledge management*. – New York, 2011. – P. 403–412.
33. DUBAY W. *The Principles of Readability // Impact Information*. – Costa Mesa, California, 2004. – 73 p.
34. HARTLEY R.V.L. *Transmission of Information // Bell System Technical Journal*. – July, 1928. – P. 535–563.

35. LEACOCK C., CHODOROW M. *Combining local context and WordNet similarity for word sense identification* // In: *WordNet: An electronic lexical database* / Ed. C. Fellbaum. – MIT Press, 1998. – P. 265–283.
36. PATWARDHAN S., BANERJEE S., PEDERSEN T. *Using measures of semantic relatedness for word sense disambiguation* // Proc. 4th International Conference on Intelligent Text Processing and Computational Linguistics. – 2003. – P. 241–257.
37. SHANNON C.E. *A Mathematical Theory of Communication* // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423, 623–656.
38. *Syntactic and semantic parser based on ABBYY Compreno linguistic technologies* / Anisimovich K.V., Druzhkin K.Ju., Minlos F.R., Petrova M.A., Selegey V.P., Zuev K.A. // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. – 2012. – С. 810–822. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2012/materials/pdf/Anisimovich.pdf> (дата обращения: 02.12.2013).

## **USING SYNTACTIC TEXT ANALYSIS TO ESTIMATE EDUCATIONAL TASKS' DIFFICULTY AND COMPLEXITY**

**Igor Naumov**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Engineer (naigsa@gmail.com).

**Valeriy Vykhovanets**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495) 926-77-84).

*Abstract: We suggest a routine for automatic assessment of complexity and difficulty of educational tasks. This routine is based on text parsing, phrases' predicative structures identification and semantic network construction. Then we develop a mathematical model which employs a notion on semantic distance between words to calculate the volume of knowledge in a semantic network. We show that the volume of knowledge in a semantic network is a measure in the space of all semantic networks, and the semantic distance makes this space the metric one.*

**Keywords:** education process, measurements in teaching, the difficulty and complexity of tasks, parsing, semantic nets, semantic distance.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым*

*Поступила в редакцию 16.06.2013.  
Опубликована 31.01.2014.*

УДК 65 + 311

ББК 65.290-2 + 60.8

## **СПОСОБ УЧЕТА СОЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ В СОЦИАЛЬНО- ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

**Мыльников Л. А.<sup>1</sup>, Максимов А. П.<sup>2</sup>**

*(Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь)*

*В статье рассмотрен подход, позволяющий формализовать принятие решений в социально-экономических системах на основе данных социальных сетей. Для этого построена модель получения численных характеристик, описывающих деловые качества персоналий на основе данных из социальной сети Facebook. Рассмотрены способы использования получаемых на модели характеристик в критериальных методах принятия решений.*

Ключевые слова: социально-экономическая система, принятие решений, модель, PLS.

### **1. Введение**

Современные компании в настоящее время широко используют данные, характеризующие людей. Начало этого процесса было положено, когда компании, работающие в интернете, стали собирать сведения о предпочтениях и об особенностях работы с сервисами различных пользователей. В частности, интернет-магазины отмечают, что разные пользователи используют разные пути для нахождения товаров, имеют разные предпочтения. Причем эти данные могут коррелировать с географическим

---

<sup>1</sup> Леонид Александрович Мыльников, кандидат технических наук, доцент (leonid@pstu.ru).

<sup>2</sup> Александр Павлович Максимов, магистр (aleksandr.p.maksimov@gmail.com).

расположением пользователей, социальной группой, к которой они относятся, полом, уровнем образования и т.д. [12]. Эффективность подходов использования и анализа данных, которые накапливаются в компаниях, является стимулом для бурного развития такой области данных, как DataMining. Для поиска новых идей анализа данных и выявления новых закономерностей компании объявляют и финансируют конкурсы в данном направлении (например, см. международный конкурс DataMiningCup). К сожалению, эффективность иногда толкает на неэтичное использование данных (например, использование данных аптек или регистратур больниц работодателями для выдавливания работников, имеющих хронические заболевания, или предложения дополнительных лекарств и услуг помимо рекомендованных врачами).

При этом существуют источники данных, в которых пользователи добровольно раскрывают о себе личные сведения. Такими источниками являются социальные сети. Социальные сети в настоящее время аккумулируют огромное количество информации. Многие люди начинают свой день с того, что узнают из них о последних новостях. С развитием информационных сетей человеческая социализация все меньше зависит от местных физических структур (транспорта и телекоммуникаций) и все больше глобализируется и виртуализируется. Вместе с этим растут и риски, связанные с политикой, криминалитетом, финансами и т.п.

Одним из замеченных при изучении современных социальных сетей феноменов является распространение информации среди участников сети, стихийное формирование групп вокруг определенных проблематик.

К социальным системам применим принцип иерархичности, принцип единства целей, принцип эмерджентности. Что в свою очередь означает, что социальная сеть может быть декомпозирована и рассмотрена как система, состоящая из множества элементов – блоков. Тем самым можно получить обобщенную модель, отображающую факторы и взаимосвязи.

Социальные сети стали явлением, которое отобразило не только социальную структуру общества, но и бизнес-отношения, новостные источники информации и т.д. Самые ча-

сто встречающиеся цели использования: создание своего имиджа, общение с друзьями и получение информации об их жизни и новостях. Многие создают бизнес в сети. Крупные кампании, не отставая от современных тенденций, анализируют страницы своих работников и кандидатов на работу для оценки личностных качеств и профессионализма. Пользователи социальных сетей организуют группы по интересам: хобби, работа, политика и т.д. Многие протестные движения зародились в социальных сетях, примерами являются организации различных протестных политических событий во многих странах мира за последние годы [1].

Большое количество исследований, связанных с влиянием социальных показателей на трудовую занятость индивида, провел немецкий ученый профессор Клаус Мозер. Примерами могут быть его статьи, такие как: «Самоконтроль и производительность труда», «Влияние сети на успех в карьере», «Чувство согласованности предсказывает занятость после потери работы», «Де-эскалация обязательств» [14, 15, 16].

В своих исследованиях проф. Мозер указывает на важнейшее влияние социальных факторов не только на конечное качество работы сотрудника, но и на его поведение при трудоустройстве [15]. Интересно отследить, как может работодатель воспользоваться данными социальных характеристик претендента.

Для изучения явлений, происходящих в социальных сетях, используют аппарат неориентированных графов [4]. Рассматривают такие задачи, как задача максимального потока и кратчайшего пути (изучение способов распространения информации), обхода дерева (планирование эффективных опросов), поиска циклов (потенциальная самоорганизовавшаяся группа) и т.п.

Формальные методы не всегда хорошо себя показывают, когда в процессе участвуют люди. Например, при распространении информации могут возникать задержки (связанные с регулярностью пользования системой того или иного человека), обрывы в распространении информации (что-то кому-то может показаться не интересным и он не будет делиться с остальными людьми), искажения или замена источников и т.д. Таким обра-

зом, основная проблема изучения и управления в социальных сетях связана со слабоформализуемыми факторами [2].

В марте 2013 года математики из Кембриджского центра психометрии и Кембриджского исследовательского подразделения Microsoft опубликовали статью об исследовании черт и атрибутов людей, предсказуемых с помощью цифровых записей поведения человека [13].

Математики использовали лайки как «обобщенный класс» цифровых данных, сходный с поисковыми запросами и историей просмотренных страниц, которые активно используются различными заинтересованными организациями для извлечения персональной информации о пользователях из интернета [6].

С помощью специально написанного предсказательного алгоритма они проанализировали историю лайков более 58 тысяч пользователей социальной сети Facebook, согласившихся участвовать в эксперименте и предоставивших исследователям данные своих персональных профилей, а также результаты психометрических онлайн-тестов, собранные при помощи проекта myPersonality<sup>3</sup>.

Результатом этого исследования стала статистическая модель, умеющая извлекать личные характеристики из истории лайков с высокой (в некоторых случаях очень высокой) точностью.

Например, модель научилась правильно угадывать сексуальную ориентацию пользователей Facebook в 88% случаев. Точно отличать чернокожих и белых американцев – в 95%, а республиканцев от демократов – в 85%. Мусульмане и христиане были правильно классифицированы в 82% случаев, а семейный статус человека и случаи злоупотребления наркотиками и алкоголем – в 65% и 73% случаев соответственно.

Стоит уточнить, что персональные характеристики, которые модель извлекла из базы данных, лишь в очень небольшом числе случаев основывались на «однозначных» кликах, что свидетельствует о хорошем аналитическом потенциале алгоритма.

Так, в 60% случаев модель сумела правильно предсказать даже такую неочевидную деталь биографии, как находились или

---

<sup>3</sup> См. <http://www.psychometrics.cam.ac.uk/productsservices/mypersonality>.



нет родители интернет-пользователя в разводе по достижении им 21 года, что, по мнению авторов, «является вполне приемлемым показателем для рекламных сервисов». Помимо уже перечисленных, модель научилась извлекать из лайков и такие характеристики, как уровень интеллекта, эмоциональной устойчивости, открытости и степень экстравертности.

Известно, что при управлении проектами до трети успеха работы коллективов зависят не от профессиональных навыков, а от социальных характеристик [11]. Таким образом, можно сделать вывод, что из данных, хранящихся в социальных сетях, можно получать информацию, пригодную для оценки персоналий и принятия решений о них, и тем самым учитывать институциональный аспект в управлении-управлении коллективами и работниками. В экономике есть организации, которые не что иное, как разные комбинации людей. Нет никаких абстрактных интересов фирмы, государства, домохозяйства – есть интересы конкретных людей [1].

Влияние личностного фактора на разные аспекты управления проектами становится, таким образом, существенным фактором.

## **2. Численное моделирование социальных характеристик**

Во многих сферах статистической обработки данных нашли применение подходы, основанные на методе PLS-путей, разработанном шведским статистиком Германом Вольдом<sup>4</sup> [19]. При использовании данного метода необходимо определить набор измеряемых переменных и скрытых за ними параметров, а также структурную модель взаимосвязей друг с другом скрытых параметров (см. рис. 1) [18]. Таким образом, возникает два блока переменных: 1) блок обозреваемых переменных; в нашем случае – данные, доступные из социальных сетей (обозначим через  $X$  и  $Y$ ); 2) блок скрытых переменных – это параметры, значения которых нам хочется определить (обозначим через  $P$  и  $Q$ ).

---

<sup>4</sup> В русскоязычной литературе иногда встречается перевод «метод частных наименьших квадратов».

В качестве обозреваемых переменных для построения модели будем использовать данные, собранные в рамках проекта *myPersonality* [13]. Будем учитывать такие параметры, как: идентификационный номер пользователя; пол; возраст; локализация интерфейса *Facebook*; статус отношений; количество друзей; политические взгляды; религиозные убеждения; количество лайков пользователя; количество изменений статуса пользователя; количество событий, на которые подписан пользователь; количество учебных заведений среднего уровня образования; количество групп, в которых состоит пользователь; количество мест работы; количество высших образований; количество отметок на фотографиях; уровень открытости; уровень добросовестности; уровень экстравертности; уровень доброжелательности; уровень нейротизма; количество друзей оценивших личностные качества пользователя; промежуточность пользователя; плотность графа друзей пользователя; уровень маклерства; идентификационный номер места жительства пользователя (город); численность населения в месте жительства пользователя; уровень удовлетворенности жизнью; уровень самоконтроля по Снайдеру.

Параметрами, которые будем определять, будут: социальная активность, популярность, открытость, экстравертность, удовлетворенность жизнью, эмоциональная стабильность, добросовестность, доброжелательность, агрессивность (социальные параметры, которые согласно исследованиям проф. Мозера характеризуют деловые качества).

В результате мы сможем записать многомерную регрессионную модель для доступных данных: входных переменных структурной модели –  $X$  (предикторов) и переменных – ответов  $Y$ .

Базовая модель многомерного PLS выглядит следующим образом (1):

$$(1) \quad \begin{aligned} X &= TP^T + E \\ Y &= UQ^T + F \end{aligned}$$

где  $X$  – матрица предикторов;  $Y$  – матрица ответов;  $T$  и  $U$  – матрицы коэффициентов;  $P$  и  $Q$  – матрицы скрытых параметров;

$E$  и  $F$  – матрицы с ошибками (предполагается, что они являются независимыми, случайно распределенными).

Для решения будем использовать алгоритм PLS, описанный в [18] и реализованный в программе SmartPLS<sup>5</sup>.

В результате решения определяется связь между входными и выходными параметрами ( $X$  и  $Y$ ) через скрытые переменные. Таким образом устанавливается степень взаимовлияния параметров (значения коэффициентов связей), что мы будем делать на массиве данных проекта myPersonality [13]. В результате выделим оказывающие наибольшее влияние параметры и окончательно получим модель. Такая модель позволяет проводить расчет параметров личностных качеств новых испытуемых.

На рис. 1 прямоугольными блоками обозначены обозреваемые переменные, а овальными – скрытые переменные.

Для анализа получаемых результатов необходимо провести градуирование значений, чтобы их оценивать. Такое градуирование можно сделать на имеющихся данных (диапазон полученного разброса социальных показателей из общей массы пользователей см. в таблице 1).

В результате построения модели получаем коэффициенты взаимосвязей, см. таблицу 2. В ней рассматриваются следующие переменные: 1 – агрессивность; 2 – доброжелательность; 3 – добросовестность; 4 – открытость; 5 – популярность; 6 – социальная активность; 7 – социальный портрет; 8 – удовлетворенность жизнью; 9 – экстравертность; 10- эмоциональная стабильность.

---

<sup>5</sup> См. ссылку <http://www.smartpls.de>.

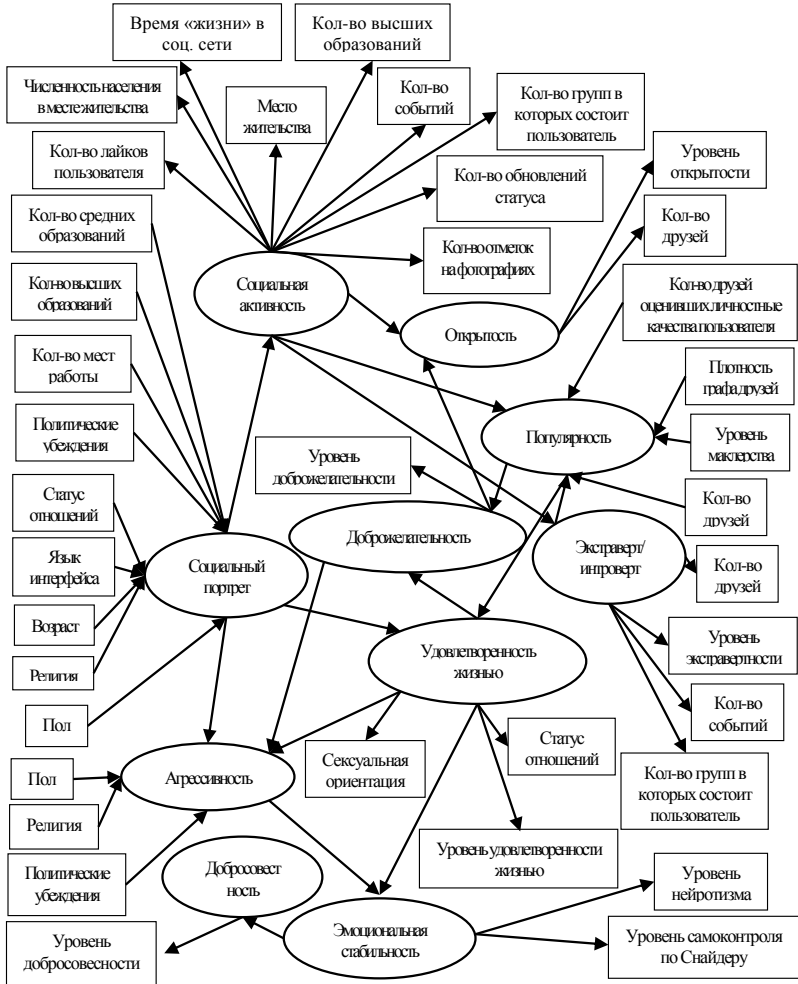


Рис. 1. Структурная модель взаимосвязи параметров

Таблица 1. Распределение пределов социальных показателей

Социальный параметр	Нижний предел	Верхний предел
Агрессивность	-5,5208	2,6789
Доброжелательность	-0,9516	18,774
Добросовестность	-0,7434	3,5085
Открытость	-1,2389	19,135
Популярность	-2,1051	17,6837
Социальная активность	-1,718	5,1822
Социальный портрет	-1,4138	6,4228
Удовлетворенность жизнью	-0,7725	2,5054
Экстравертность	-3,5842	18,106
Эмоциональная стабильность	-0,7558	3,5369

Таблица 2. Коэффициенты взаимосвязей переменных

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2	0,054			0,977				0,574		
3										
4										
5		0,934						1,289		
6				0,021	0,078				0,164	
7			0,002			0,922		0,082		
8										0,408
9					0,963					
10	0,025		0,999							

Входные и выходные коэффициенты связей с данными для социальных параметров представлены в таблице 3. Здесь обозначено: 1 – агрессивность; 2 – доброжелательность; 3 – добросовестность; 4 – открытость; 5 – популярность; 6 – социальная активность; 7 – социальный портрет; 8 – удовлетворенность жизнью; 9 – экстравертность; 10 – эмоциональная стабильность; 11 – возраст; 12 – промежуточность пользователя; 13 – плотность графа друзей пользователя; 14 – уровень доброжелательности; 15

- уровень добросовестности; 16 - уровень экстравертности; 17 - уровень нейротизма; 18 - уровень открытости; 19 - количество друзей, оценивших личностные качества пользователя; 20 – пол; 21 - языковая версия интерфейса Facebook; 22 - идентификационный номер места жительства; 23 - количество средних образований; 24 - количество высших образований; 25 - количество событий; 26 - количество групп, в которых состоит пользователь; 27 - количество лайков пользователя; 28 - количество обновлений статуса; 29 - количество отметок на фотографиях; 30 - количество мест работы; 31 - уровень маклерства; 32 - количество друзей; 33 - политические убеждения; 34 - численность населения в месте жительства; 35 - статус отношений; 36 - религиозные взгляды; 37 - уровень самоконтроля по Снайдеру; 38 - уровень удовлетворенности жизнью.

Таблица 3. Входные/выходные коэффициенты для параметров

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11							0,064			
12						0,069				
13					-0,029					
14		0,148								
15			0,068							
16									0,918	
17										0,08
18		0,802		0,996						
19					0,972					
20	0,311						-0,005			
21							-0,006			
22						0,407				
23							0,011			
24						0,918	0,948			
25						0,222			-0,053	
26						0,393			-0,201	
27						0,017				
28						0,334				
29						0,411				
30							0,037			

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
31					0,033					
32				-0,147	-0,299				-0,403	
33	1,444						0,003			
34						0,035				
35							0,037	0,032		
36	-0,74						-0,002			
37			0,987							0,985
38		0,195						0,998		

Для проверки работы модели проведен расчет социальных параметров трех пользователей, данные которых были взяты не из проекта myPersonality [13]. Для получения полной информации для исследования большая часть данных была собрана непосредственно из социальной сети. Остальная информация была получена в ходе анкетирования. Данные были добавлены к уже существующей базе. Рассчитанные для анализа социальные показатели трех пользователей представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты оценки модели на тестовых пользователях

	Пользователь №1	Пользователь №2	Пользователь №3
Агрессивность	-1,1073	-0,4044	-2,9693
Доброжелательность	2,9261	3,7513	3,2719
Добросовестность	2,0639	2,2821	1,4272
Открытость	2,6492	3,4676	2,7514
Популярность	4,9115	3,2504	1,2622
Социальная активность	0,3089	-0,0794	0,4199
Социальный портрет	0,8181	0,2321	0,8521
Удовлетворенность жизнью	1,8918	1,4367	1,1053
Экстравертность	4,2956	3,6389	3,1661
Эмоциональная стабильность	1,9821	2,1622	1,2956

На основании полученных данных можно утверждать о том, что модель работает корректно. Полученные данные подтвердили реальные результаты сравнения соответствующих социальных качеств у респондентов. Наибольшая точность в расчетах была достигнута в параметрах «открытость», «популярность», «удовлетворенность жизнью» и «эмоциональная стабильность». Параметры «добросовестность» и «экстравертность» показали меньшую точность результатов исследования.

Исходя из данных, полученных о социальных характеристиках соискателя, можно представить не только уровень его исполнительности и степень ответственности к выполняемой работе, но и оценить способности работы в команде, подходящий график и место работы. В исследованиях профессора Мозера, например, представлена четкая корреляция между уровнем социальных навыков и продуктивностью работы специалиста, между степенью самоконтроля и продуктивностью работы. Таким же образом прослеживаются взаимосвязи между эмоциональной стабильностью, доброжелательностью и умением работать в команде [14, 15, 16]. Человек, удовлетворенный жизнью, будет более исполнительным и добросовестным сотрудником.

Данные, получаемые в ходе моделирования, можно дополнять или уточнять данными, имеющимися у работодателя. Например, показатели методик личных и деловых качеств [8] или оценки конкретных работников, проводимые на предприятиях в ходе аттестации.

### **3. Использование результатов численного моделирования**

Получение количественных мер, характеризующих человека, позволяют учитывать эти характеристики при формировании коллективов, оценивать людей в работе по конкретным проектам, а значит, снизить уровень неопределенности и повысить качество управления [9].

В настоящее время для формирования коллективов пространство получили методы, основанные на накоплении статистики о деятельности людей и их профессиональных качествах. Например, в Германии – методы анализа количества



и скорости выполнения поручений в зависимости от графиков и условий работы [15], в России – методы, основанные на учете достижений сотрудника в течении его карьеры (см. например, методика оценки эффективности труда, личных и деловых качеств работников НИИ [8]).

Современная теория управления, повышая в процессе своего развития уровень формализации, старается строить «обобщенные производственные функции» и строить процесс управления на их основе [10].

Однако, учитывая то, что для принятия решения требуется статистика, принимать объективные решения без нее затруднительно. Именно поэтому могут возникать сложности с трудоустройством или объективной оценкой качеств человека на начальных этапах его карьеры.

Учитывая, что имеется корреляция между 1) уровнем социальных навыков и продуктивностью работы специалиста, 2) степенью самоконтроля и продуктивностью работы и т.д. [14, 15, 16], можно использовать эти данные, если представить их как площади фигур, ограниченные показателями [5], для построения компонента обобщенной производственной функции. Таким образом, чем больше будет площадь фигуры, построенной по значениям вычисленных показателей, тем большую пользу специалист может принести своей организации. Причем при использовании данных социальных сетей влияние профессиональной статистики не будет обязательным фактором.

Экономико-математическая модель включает формализованное описание критерия выбора, т.е. целевую функцию, компонентом которой как раз и будет площадь получаемой фигуры, а производственная функция будет записана в виде задачи минимизации квадрата разностей (4) [7]:

$$(4) \quad \sum_{j=1}^{l_1} k_j (h_j - M_j)^2 + \sum_{j=l_1+1}^{l_2} k_j M_j - \sum_{j=l_2+1}^{l_3} k_j M_j \rightarrow \min ,$$

где  $l_1, l_2, l_3$  – границы групп по виду критериальной функции ( $l = l_1 + l_2 + l_3$ );  $h_j$  – желаемое значение;  $k_j$  – элементы вектора корректирующих коэффициентов;  $M_j$  – оценки методик.

Такой подход позволяет работать не только с отдельными персоналиями, но и с целыми коллективами, вводя усредненные оценки. Эти усредненные оценки показателей будут отображать тенденции, которые сможет получить коллектив при выборе того или иного сотрудника, тем самым можно проанализировать влияние каждого человека на работоспособность рабочего и творческого коллектива.

Алгоритм использования оценок из социальных сетей может быть представлен как на рис. 2.

Данные, получаемые в ходе исследований, можно дополнять или уточнять данными, имеющимися у работодателя. При этом не следует думать, что данные социальных сетей не всегда являются достаточными для принятия окончательного решения, так как поведенческие компетенции, хотя и являются ключевыми, но не однозначно характеризуют работника (см. рис. 3 [11]).

Использование полученного подхода возможно только совместно с другими подходами формирования и управления, ориентирующимися на профессиональные оценки, навыки, компетенции [8]; организацию грамотного стимулирования [1]; методы формирования коллективов по психологическим аспектам [5] и т.д.

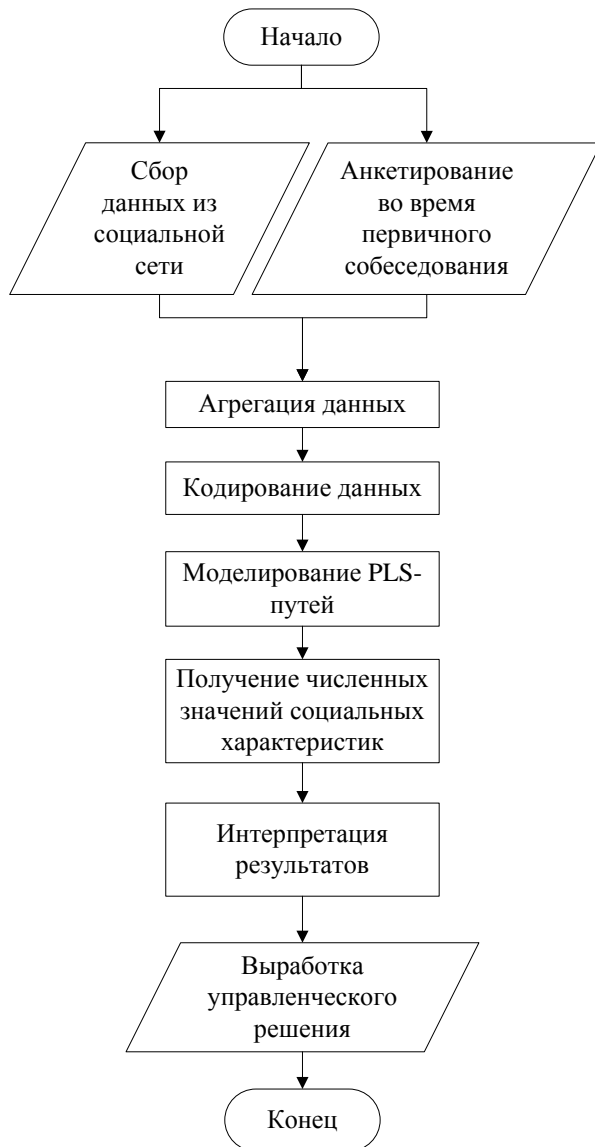


Рис. 2. Алгоритм использования методики анализа данных из социальных сетей



Рис. 3. Степень влияния различных компетенций на реализацию проектов

#### 4. Заключение

Социальные сети в современном мире являются не только областью развлечения и общения людей, но и источником статистической информации. Эти данные представляют практический интерес в различных областях социологических исследований. Результаты данных исследований, бесспорно, являются источником для внедрения различных автоматизированных систем для ведения бизнеса. В данной работе было представлено

лишь одно из возможных направлений внедрения систем поддержки принятия решений.

Построена модель методом PLS-путей по результатам анализа массива данных более чем 57 тыс. пользователей социальной сети Facebook. Получены матрицы коэффициентов взаимосвязей социальных параметров с входными данными. Также представлен подход использования полученных результатов.

### **Литература**

1. АУЗАН А. *Институциональная экономика для чайников* // Esquire. – 2010–2011. – №55–66. (Цикл статей)
2. БУРКОВ В.Н., КОРГИН Н.А., НОВИКОВ Д.А. *Введение в теорию управления организационными системами*. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 264 с.
3. ГУБКО М.В. *Управление организационными системами с коалиционным взаимодействием участников*. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 140 с.
4. ГУРЕВИЧ И.М. *Законы информатики – основа строения и познания сложных систем*. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 400 с.
5. ЕВИН И.А. *Введение в теорию сложных сетей* // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2, №2. – С. 121–141.
6. КРАСОВСКИЙ Ю.Д. *Организационное поведение*. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 511 с.
7. МАЛЯНОВ Д. *Портрет, нарисованный лайками* – [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.gazeta.ru/science/2013/03/12\\_a\\_5052569.shtml](http://www.gazeta.ru/science/2013/03/12_a_5052569.shtml) (дата обращения: 02.08.2013).
8. МЫЛЬНИКОВ Л.А. *Управление инновационными проектами на основе составного интегрального критерия* // Управление большими системами. – 2010. – №29. – С. 128–151.
9. ПЕРЕХОДОВ В.Н. *Основы управления инновационной деятельностью*. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 222 с.
10. ПРАНГИШВИЛИ И.В. *Системный подход и общесистемные закономерности*. – Серия «Системы и проблемы управления». – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.

11. СЕЛИВАНОВ С.Г., ГУЗАИРОВ М.Б., КУТИН А.А. *Инноватика: Учебник для вузов.* – М.: Машиностроение, 2008. – 721 с.
12. KAMMERER S., AMBERG M., LANG M. *Führung im IT-Projekt: Fachliche und soziale Kompetenzen für den Projekterfolg.* –Düsseldorf: Symposion, 2012. – 394 p.
13. KOBSA A., KOENEMANN J., POHL W. *Personalized hypermedia presentation techniques for improving online customer relationships* // KnowlEng Rev. – 2001. – Issue 16(2). – P. 111–155.
14. KOSINSKI M., STILLWELL D., GRAEPEL T. *Private traits and attributes are predictable from digital records of human behavior* // Proc. National Academy of Sciences, University of Cambridge, 2013. –P. 1–4.
15. MOSER K., GALAIS N. *Self-monitoring and job performance: The moderating effect of tenure* // International Journal of Selection and Assessment. – 2007. –Vol. 15. –P. 83–93.
16. MOSER K., SENDE C. *Organisations psychologie* / In A. Schütz, M. Brand, H. Selg, S. Lautenbacher (Hrsg.) *Psychologie. Eine Einführung in ihre Grundlagen und Anwendungsfelder.* – Stuttgart: Kohlhammer, 2011. –P. 423–438.
17. MOSER K., WOLFF H.G., KRAFT A. *The de-escalation of commitment: Predecisional accountability and cognitive processes* // Journal of Applied Social Psychology. –2013. – Vol. 43.–P. 363–376.
18. MYLNIKOV L., MAKSIMOV A. *Use social networks to make decisions* // 3rd International Conference on Applied Social Science (Taipei, Taiwan, 15–16 January 2013).–P. 137–139.
19. TENENHAUS M., VINZI V.E., CHATELIN Y.-V., LAURO C. *PLS path modeling* // Computational statistics & data analysis. – 2005. – Vol. 48. – P. 159–205.
20. VINZI V., CHIN W.W., HENSELER J. et al. *Handbook of Partial Least Squares: Concepts, Methods and Applications*, 2010. – 850 p.

## **USING DATA FROM SOCIAL NETWORKS TO MAKE DECISIONS IN SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS: ACCOUNTING OF SOCIAL FACTORS**

**Leonid Mylnikov**, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Cand.Sc., assistant professor (leonid@pstu.ru).

**Alexandr Maksimov**, Perm National Research Polytechnic University, Perm, graduate student (aleksandr.p.maksimov@gmail.com).

*Abstract: We suggest an approach of using data from social networks for decision-making in socio-economic systems. We develop the model to calculate personal cues and business proficiency of individuals using data from Facebook social network and discuss applications of the obtained metrics in criteria-based decision making routines.*

Keywords: socio-economic system, decision support, model, approach, PLS.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии А.Г. Чхартишвили*

*Поступила в редакцию 06.08.2013.*

*Опубликована 31.03.2014.*

УДК 681.5  
ББК 65.050

## **ВЫБОР ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ТРАНСФЕРЕ ЗАПАДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОТРАСЛИ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ<sup>1</sup>**

**Акинфиев В. К.<sup>2</sup>**

*(ФГБУН Институт проблем управления РАН, Москва)*

*В работе исследуются задачи выбора параметра «степень локализации» при трансфере высокоэффективных западных транспортных технологий. Данный тип инвестиционных проектов относится к многоцелевым проектам, участники которых преследуют свои цели, эффективность достижения которых должна быть оценена. Предложена схема согласования интересов участников проекта, основанная на модели минимизации суммы компромиссов.*

Ключевые слова: трансфер западных технологий, степень локализации производства, многоцелевые инвестиционные проекты.

### **1. Введение**

Стратегической целью инновационного развития ОАО РЖД является повышение эффективности деятельности компании при постоянном росте качества предоставляемых услуг, высоком уровне инноваций и безопасности перевозок. Одно из направлений инновационного развития компании связывается с повышением эффективности работы на основе внед-

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект №12-08-13175/12.

<sup>2</sup> Валерий Константинович Акинфиев, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ([akinf@ipu.ru](mailto:akinf@ipu.ru)).



рения новейших методов и средств управления, высокоэффективных транспортных технологий, технических средств и подвижного состава.

Сегодняшнее состояние технологий и технических средств ОАО РЖД характеризуется высоким износом основных фондов, наличием значительного количества устаревших образцов техники и их низкими техническими и эксплуатационными характеристиками. Сравнение применяемых транспортных технологий, технических средств и подвижного состава ОАО РЖД с зарубежными аналогами показывает существенное отставание по ключевым показателям вагонов, локомотивов, электротехнических и электронных устройств [4].

Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года на период 2008–2015 годов предусматривается объем инвестиций на модернизацию и развитие железнодорожного транспорта в размере более 4000 млрд. рублей [4].

Модернизация железнодорожного транспорта и внедрение высокоэффективных транспортных технологий связана прежде всего с международным научно-техническим сотрудничеством, приоритетом которого является трансферт технологий, в том числе в области разработки современного подвижного состава и путевой техники.

В этой связи следует отметить крупнейшую в мире международную выставку транспортных технологий «INNOTRANS», которая проходит ежегодно в Берлине (Германия), где представлены все мировые лидеры в области инноваций и производства техники для железнодорожного транспорта. Последние годы ОАО РЖД заключила ряд контрактов с ведущими мировыми производителями, среди которых следует отметить контракты с немецким концерном SIEMENS и с французским ALSTOM TRANSPORT [4].

Так, высокоскоростные поезда «Сапсан», производимые концерном SIEMENS, закупаются в Германии с 2009 г. Такое решение продиктовано простой экономической логикой: потребность в них не превышает нескольких десятков составов, отечественных аналогов этим поездам пока нет, а ради такого

количества организовывать производство в России «с нуля» нецелесообразно.

Если потребность ОАО РЖД в транспортных технологиях или в технике более значительная, то вопрос локализации иностранного производства на российской территории становится актуальным. В этом смысле проект производства электропоезда «Ласточка» является хорошим примером. Потребность в электричках нового поколения в России весьма существенна, поэтому в 2011 года ОАО РЖД, ЗАО «Группа Синара» и концерн SIEMENS подписали контракт на поставку 1200 вагонов электропоездов «Ласточка» (типа «Desiro RUS») для РЖД с 2015 по 2020 гг. Общая стоимость контракта составит более 2,1 млрд. евро.

Производство «Ласточек» будет организовано на ООО «Уральские локомотивы». Согласно контракту в течение 2015 года «Уральские локомотивы» выпустят 30 пятивагонных электропоездов. Первоначально уровень локализации составит 35%, по мере выполнения контракта уровень локализации будет доведен до 80%. В кооперационных поставках комплектующих компонентов будут участвовать более 80 российских предприятий.

Следует отметить, что последние годы темпы реализации инвестиционных проектов по локализации иностранных технологий существенно увеличились. Так, например, ЗАО «Трансмашхолдинг» реализует масштабную программу стратегического партнерства с ALSTOM TRANSPORT. В соответствии с достигнутыми договоренностями, ALSTOM TRANSPORT взял на себя обязательство оказывать ЗАО «Трансмашхолдинг» поддержку в модернизации входящих в его состав заводов и разработке нового поколения железнодорожной техники для российского рынка. Принято решение о вхождении французской компании в капитал российского холдинга. Создана совместная инжиниринговая компания – ООО «Технологии рельсового транспорта», целью которой является разработка новых моделей подвижного состава для российского железнодорожного транспорта. Новая компания также призвана заниматься

созданием в России центров компетенции по разработке новых продуктов на базе ноу-хау, которыми обладают стороны.

Кроме этого в Пензе начал строиться завод по производству дизельных двигателей большой мощности с финской компанией WARTSILA CORPORATION. Есть примеры подобного сотрудничества и с североамериканскими компаниями, в том числе с корпорацией AMSTED RAIL COMPANY реализуются проекты по производству в России железнодорожных кассетных подшипников, а также по выпуску грузовых вагонных тележек MOTION CONTROL, с компанией CATERPILLAR планируются к реализации проекты в области локомотивостроения.

Особенно активную позицию на российском рынке занимает концерн SIEMENS, который в ближайшие годы планирует реализацию инвестиционной программы по созданию полной технологической линейки – от НИОКР до сервисного обслуживания производимой техники. Программа предусматривает организацию порядка 10 новых производств, на которых будет создано 4 тыс. рабочих мест [4].

Реализация таких проектов очень полезна для ОАО РЖД и экономики страны в целом. Во-первых, такие проекты вносят существенный вклад в развитие современной высокотехнологичной железнодорожной индустрии в России, в том числе и со значительным экспортным потенциалом для нужд всего «Пространства-1520». Во-вторых, происходит эффективная взаимная адаптация опыта и знаний зарубежных и отечественных компаний.

Одной из ключевых проблем при организации таких проектов является выбор оптимального параметра степень локализации производства.

Термин «Локализация производства» означает процесс переноса на территорию России технологий, их адаптацию и организацию сборочного производства образцов зарубежной техники с частичным изготовлением некоторых комплектующих узлов и деталей на российских предприятиях. Степень локализации производства характеризует долю затрат российских предприятий в общей себестоимости производства образца техники.

Параметр «степень локализации производства»  $\gamma$  в процентах принято определять по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{C - I}{C} \times 100,$$

где  $C$  – внутризаводская полная себестоимость серийного изготовления образца на российских предприятиях;  $I$  – стоимость закупок технологии и комплектующих иностранного производства в пересчете на единицу продукции.

Заметим, что выбор данного параметра является сложной задачей и зависит от большого количества данных, полученных в результате глубокого экономического, технического и маркетингового анализа и проработки вариантов инвестиционных проектов организации и размещения производства.

## **2. Постановка проблемы и подходы к решению**

Рассмотрим постановку исследуемой задачи более подробно.

1. Пусть имеется множество образцов высокоэффективных транспортных технологий и подвижного состава (например, локомотивов), предлагаемых различными зарубежными компаниями – лидерами в данной области.

Каждый образец имеет:

– набор технических и эксплуатационных параметров. Например, для тепловозов это мощность по дизелю (кВт), нагрузка от оси на рельсы (кН), колесная формула, сила тяги при трогании с места (кН), мощность длительного режима (кВт), конструкционная скорость (км/ч), тип электрической передачи, тип привода и др.;

– экономические параметры (стоимость образца, затраты на его эксплуатацию и др.)

Каждая компания может предлагать несколько вариантов контрактов с российской стороной, отличающихся условиями, в том числе степенью локализации технологии, включая следующие варианты:

– Продажа готовых образцов – степень локализации равна нулю.

– Сборка образца на российской территории российским производителем с использованием в основном узлов и агрегатов зарубежного производства (двигатели, система управления и пр.) – степень локализации находится в интервале до 50%.

– Производство зарубежного образца полностью на российской территории и российским производителем с использованием только ключевых компонент зарубежного производства – степень локализации находится в интервале 50%–75%.

– Создание технологической цепочки – от НИОКР до производства и сервисного обслуживания производимой техники на российской территории – степень локализации находится в интервале 75%–100%.

Задача заключается в выборе параметров наиболее эффективного образца транспортной технологии или подвижного состава из имеющихся предложений и, одновременно, варианта локализации его производства на российской территории. В качестве интегрального показателя оптимальности выбора в работе используется показатель «Стоимость жизненного цикла» [3].

Предлагаемая общая схема решения задачи включает три этапа (рис. 1).

**Этап 1. Предварительный отбор образцов** транспортных технологий зарубежных компаний на основе многокритериальных методов, включая оценку степени их инновационности и перспектив использования на российском рынке. При этом желателен выбор нескольких альтернативных вариантов.

**Этап 2. Оценка организационно-технологических и финансовых решений по реализации инвестиционных проектов локализации производства.** Построение производственно-финансовых моделей проектов, проведение вариантных расчетов и оценка показателей их эффективности для его участников. Расчет оптимального параметра «Степень локализации» производства (для каждого альтернативных вариантов – кандидата) исходя из потребности ОАО РЖД, возможности реализации на внешних рынках, экономической эффективности и целесооб-

разности с точки зрения ОАО РЖД и других участников и заинтересованных сторон.

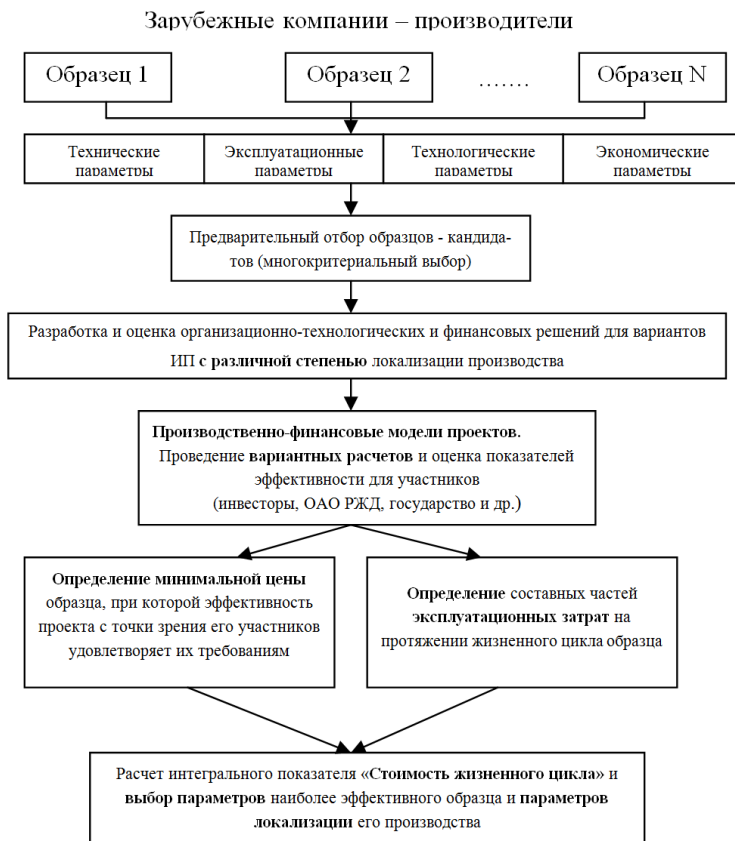


Рис. 1 Общая схема решения задачи

Заметим, что каждый вариант – это крупный инвестиционный проект, который должен быть всесторонне проработан и просчитан с разных позиций (коммерческая, бюджетная и народнохозяйственная эффективность). При этом может варьироваться схема финансирования проекта, включая варианты участия инвесторов (российских и иностранных). Данный этап предполагает построение производственно-финансовой модели

проекта создания нового производства. Методика построения производственно-финансовых моделей с использованием программного комплекса ТЭО-ИНВЕСТ подробно изложена в [1, 5].

**Этап 3. Окончательный выбор образца и варианта локализации его производства** на российской территории по совокупности рассчитанных и оцененных характеристик на основе интегрального показателя «Стоимость жизненного цикла». Этап включает определение минимальной цены образца, при которой эффективность проекта с точки зрения его участников удовлетворяет их требованиям. Далее оцениваются эксплуатационные затраты на протяжении жизненного цикла образца и производится расчет показателя «Стоимость жизненного цикла», на основе которого и выбираются наиболее эффективный образец и параметры локализации его производства.

Заметим, что взаимосвязанное решение исследуемой задачи по выбору параметров высокоэффективных транспортных технологий для различных типов (сегментов) технологий (например, магистральные, маневровые и прочие типы тепловозов) позволяет сформировать раздел «Дорожной карты» инновационного и технологического развития ОАО РЖД.

### **3. Задача выбора параметра «степень локализации» по критерию минимизации показателя «стоимость жизненного цикла»**

Для оценки эффективности инновационных мероприятий и закупки технологий и технических средств на железнодорожном транспорте используется показатель «стоимость жизненного цикла» (Life Cycle Cost – LCC). Показатель LCC с экономической точки зрения характеризует эффективность и конкурентоспособность технологий и технических средств и включает все затраты потребителя при их использовании.

Как правило, рост уровня инновационности и качества образца технологий и технических средств сопровождается снижением эксплуатационных расходов и ростом затрат на его закупку. Поэтому новый подвижной состав и сложные техниче-

ские системы железнодорожного транспорта, хотя и могут на протяжении срока службы иметь более высокую первоначальную стоимость, должны обеспечивать значительно более низкие эксплуатационные расходы по сравнению с существующей техникой.

Стоимость жизненного цикла технического средства включает все затраты потребителя, связанные с его приобретением и владением им, т.е. цену приобретения, сопутствующие единовременные расходы, а также эксплуатационные издержки за весь срок службы и расходы на утилизацию.

Годовые эксплуатационные расходы – текущие затраты на эксплуатацию подвижного состава и сложных технических систем – рассчитываются в соответствии с номенклатурой доходов и расходов по видам деятельности ОАО РЖД и состоят из затрат [3]:

- на энергоресурсы и расходные материалы;
- на содержание эксплуатационного персонала;
- на чистку и мойку подвижного состава;
- на техническое обслуживание, текущие, капитальные и неплановые ремонты.

Затраты на энергоресурсы – электроэнергию или дизельное топливо – являются основной составляющей годовых эксплуатационных расходов для тягового подвижного состава. Эти издержки включают в себя плату за использование энергоресурсов в поездной и (или) внепоездной работе, а также для обогрева тягового подвижного состава при его «отстое», для вентиляции локомотивного оборудования и т.п. К расходам на эксплуатацию относятся также затраты на экипировочные материалы (смазку, воду для охлаждения дизеля, песок, используемый для повышения сцепления колес с рельсами и т.д.).

Годовые эксплуатационные расходы на ремонт включают затраты:

- текущий ремонт и обслуживание, включая расходы по оплате труда;
- маневровую работу на станциях;
- экипировку локомотивов и пассажирских вагонов;



– капитальный и непланный ремонт подвижного состава и сложных технических систем;

Стоимость жизненного цикла рассчитывается по формуле:

$$(1) \quad LCC = C + \sum_{t=1}^T OC_t \cdot \alpha_t - LC_T \cdot \alpha_T,$$

где  $C$  – стоимость приобретения серийного образца техники (отпускная цена производителя);  $OC_t$  – годовые расходы на его эксплуатацию;  $LC_T$  – ликвидационная (утилизационная) стоимость образца техники;  $\alpha_t$  – коэффициент дисконтирования;  $t$  – текущий год эксплуатации;  $T$  – конечный год эксплуатации.  $T$  устанавливается в соответствии с техническими требованиями или иной документацией (в том числе и учетной политикой предприятия, на балансе которого числится образец техники).

Как правило, инновационный образец обладает более высокой надежностью и энергоэффективностью (снижение эксплуатационных затрат за счет экономии потребления энергоресурсов) по сравнению с существующими образцами и требует меньшее количество ремонтов. Выбор параметра «Степень локализации» при производстве образца техники или технологии влияет на все составляющие, входящие в формулу расчета параметра стоимости жизненного цикла.

**Себестоимость производства и отпускная цена изделий производителя.** Влияние имеет сложный характер. При увеличении параметра «Степень локализации» можно ожидать снижение прямых затрат на производство за счет более низкой стоимости труда, материалов и энергоносителей на российской территории и меньших транспортных издержек и таможенных платежей, однако при этом возрастает финансовая нагрузка на предприятие за счет оплаты лицензий и обслуживания долговой нагрузки.

**Эксплуатационные расходы у приобретателя технологии (ОАО РЖД),** в том числе на стоимость капитального, текущего ремонт и обслуживания. Чем выше параметр «Степень локализации», тем, как правило, меньше эти затраты вследствие наличия отечественных мощностей по производству деталей и агрегатов для ремонта, а также соответствующих специалистов.

Очевидно, что стоимость жизненного цикла образца технологии или подвижного состава при прочих равных условиях

уменьшается при снижении отпускной цены производителя. В этой связи возникает задача минимизации цены производителя за счет выбора параметров и вариантов реализации инвестиционных проектов организации производства техники на российских предприятиях и на российской территории.

В таблице 1 приведен условный пример, иллюстрирующий зависимость показателя  $LCC$  от выбора варианта закупки образца техники и степени локализации его производства на российской территории.

Таблица 1. Зависимость показателя  $LCC$  от выбора варианта закупки образца техники

Вариант	$C$	$\sum_{t=1}^T OC_t \cdot \alpha_t - LC_T$	$LCC$
Серийный отечественный локомотив	4200	7000	11200
Инновационный зарубежный локомотив	5000	5500	10500
Инновационный зарубежный локомотив. Производство с 25% локализацией в РФ	5200	5500	10700
Инновационный зарубежный локомотив. Производство с 75% локализацией в РФ	4500	5000	9500

Как видно из таблицы, минимальному значению показателя  $LCC$  соответствует вариант производства инновационного зарубежного локомотива с 75% локализацией на территории РФ.

Рассмотрим формализованную постановку задачи. Пусть  $i$  – индекс образца технологии или технического средства;  $\gamma_i$  – степень локализации производства  $i$ -го образца на российской территории;  $P_i(\gamma_i)$  – стоимость образца для покупателя при степени локализации  $\gamma_i$ ;  $j$  – индекс участника проекта;  $\eta_{ij}$  – условия участия в проекте по локализации  $i$ -го образца.

Условия участия могут задавать различное распределение долей в уставном капитале проекта, условия привлечения кредитных ресурсов и пр., что, в конечном итоге, влияет на показате

тели, характеризующие эффективность участия в проекте и, соответственно, на выбор  $\gamma_i$ .

Задача заключается в минимизации показателя  $LCC$  (характеризует конкурентоспособность и эффективность образца).

$$(2) \quad LCC(\gamma_i, \eta_i, p_i) \rightarrow \min$$

при ограничениях на допустимый показатель  $LCC$ :

$$(3) \quad LCC(\gamma_i, \eta_i, p_i) \leq LCC_0,$$

где  $LCC_0$  – показатель «Стоимость жизненного цикла» образца при  $\gamma_i = 0$ .

При ограничениях на допустимые показатели эффективности проекта для его участников:

$$(4) \quad NPV_j(\lambda_i, \eta_{ij}, p_i) \geq NPV_j^*,$$

где  $NPV_j^*$  – показатель чистого дисконтированного дохода (или любой другой набор показателей), характеризующих желательную (приемлемую) эффективность проекта для его участников.

Решение задачи включает определение минимальной стоимости жизненного цикла изделия, при которой эффективность проекта удовлетворяет требованиям его участников (3)–(4). Общая схема решения данной задачи приведена на рис. 2.

Рассмотрим сначала вариант, когда эффективность проекта оценивают две группы участников – потребители продукции (ОАО РЖД) и инвесторы.

Метод решения данной задачи состоит в сравнении и выборе вариантов инвестиционной программы на основе оценки показателей их эффективности, рассчитанных с использованием компьютерной производственно-финансовой модели инвестиционного проекта локализации производства продукции (рис. 2).

В качестве параметра модели выступает степень локализации производства, а в качестве варьируемой переменной – отпускная цена продукции. Для решения задачи могут быть использованы различные переборные алгоритмы и оптимизационно-имитационные методы поиска [1, 2].

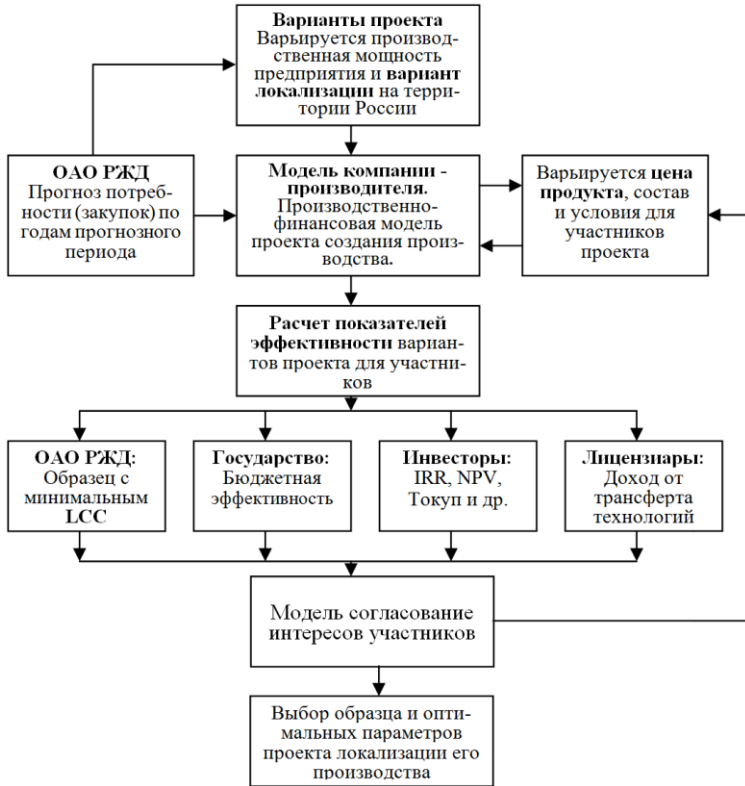


Рис. 2 Выбор параметра локализации с учетом согласования интересов участников проекта

В таблице 2 приведен иллюстративный пример, показывающий связь между эффективностью проекта локализации для инвестора (показатель внутренней нормы доходности в %), вариантом локализации и стоимостью приобретения серийного образца техники (отпускная цена производителя). Если, например, минимально приемлемая для инвесторов эффективность проекта по показателю внутренней нормы доходности ( $IRR$ ) составляет 15% (ограничение (4)), то минимальная отпускная цена продукции и, соответственно, показатель  $LCC$  (критерий (2)) достигается при выборе варианта закупки образца техники и

степени локализации его производства на российской территории равной **75%**.

*Таблица 2. Зависимость показателя IRR от выбора степени локализации и цены продукции*

Отпускная цена продукции – С	Вариант локализации			
	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)	4 (100%)
5000	17%	21%	24%	19%
4900	16%	19%	21%	17%
4700	14%	16%	18%	15%
4500	12%	14%	15%	13%

Производственно-финансовая (имитационная) модель инвестиционного проекта создания производства образца с различной степенью локализации может быть реализована с использованием программного комплекса ТЭО-ИНВЕСТ. ТЭО-ИНВЕСТ позволяет построить производственно-финансовую модель действующего или вновь создаваемого предприятия, с помощью которой оценивать производственные и финансовые планы предприятия, проводить сценарный анализ управленческих решений и выбирать наиболее эффективные из них, выбирать оптимальную схему финансирования проекта и проводить расчет показателей эффективности вариантов проекта [5]. К настоящему времени накоплен большой опыт использования ТЭО-ИНВЕСТ для моделирования и оценки инвестиционных проектов в различных отраслях промышленности, включая машиностроение [1, 2].

#### **4. Выбор параметра локализации с учетом согласования интересов участников проекта**

Рассмотрим теперь общий случай данной задачи, представленный на рис. 2. Эта задача является достаточно сложной, так

как связана с согласованием интересов всех участников проекта, которые имеют, как правило, противоречивые цели.

Таким образом, минимальная стоимость жизненного цикла образца зависит от достижения компромисса, при котором эффективность проекта с точки зрения его участников удовлетворяет их требованиям. Данный тип инвестиционных проектов относится к многоцелевым проектам, участники которого преследуют свои цели, эффективность достижения которых должна быть оценена.

Проанализируем цели участников проектов рассматриваемого типа.

**Потребители продукции** (ОАО РЖД) заинтересованы в приобретении образцов технологии и техники с минимальным значением *LCC*, т.е. в таком показателе степени локализации, который обеспечит максимальное снижение отпускной цены изделия и издержек при его эксплуатации. Это позволяет повысить эффективность деятельности Компании. Кроме этого ОАО РЖД может участвовать в проекте в качестве одного из инвесторов.

**Государство** заинтересовано в максимизации показателя степени локализации. Государство получает эффект в виде дополнительных налоговых поступлений, создания новых высокотехнологических рабочих мест, модернизации промышленных предприятий на основе современных технологий. Интегральная оценка бюджетной и народнохозяйственной эффективности проекта локализации производства на российской территории должна включать также оценку эффектов от реализации проекта в смежных отраслях промышленности и на транспорте.

**Инвесторы** желают максимизировать отдачу на вложенный капитал (*NPV*, *IRR*), при этом, естественно, они не заинтересованы в снижении отпускной цены изделия и показателя *LCC*.

**Иностранные компании (лицензиары)** получают доход от продажи лицензий, передачи технологий, продажи оборудования и комплектующих узлов собственного производства. При этом они заинтересованы в заключении контрактов, предусмат-

ривающих максимальную стоимость своих услуг и поставок и, соответственно, им не очень интересна максимизация показателя степени локализации. Кроме этого лицензиары могут участвовать в проекте в качестве одного из инвесторов.

**Российские компании – производители** получают прибыль от организации нового производства, приобретают новые компетенции и современные технологии производства и управления, что способствует увеличению финансовых показателей их работы, росту конкурентоспособности и рыночной стоимости. Они заинтересованы в максимизации показателя степени локализации, при этом им не интересно снижение отпускной цены изделия и показателя *LCC*. Кроме этого компании-производители могут также участвовать в проекте в качестве одного из инвесторов.

Заметим, что в зависимости от предъявляемых требований к показателям эффективности, характеризующих цели различных участников проекта, неравенство (4) может не выполняться ни для одного варианта инвестиционного проекта локализации производства.

Как показано выше, целевые функции участников проекта не совпадают и противоречивы. Принятие решения о выборе образца транспортной технологии или подвижного состава и варианта локализации его производства на российской территории может основываться только на согласовании и достижении баланса интересов участников проекта (рис. 2).

Заметим, что методы выбора решений группой участников, имеющих различные предпочтения по отношению к альтернативным вариантам, рассматриваются в литературе по анализу групповых решений (Group decision analysis), в том числе в [6–8].

В качестве модели согласования интересов может быть использован метод минимизации суммы компромиссов участников. Метод основан на сворачивании числовых и нечисловых оценок эффективности проекта участниками в интегральный показатель эффективности каждого участника, который выражает консенсус экспертов, менеджеров и руководства компании-участника.

Пусть  $\psi_j$  – оценка интегрального показателя эффективности и пусть  $\psi_j$  задается на интервале  $[0, 10]$ . Величина  $\psi_j$  для различных вариантов локализации производства различна. Оценка компромисса участника при выборе варианта инвестиционного проекта, отличного от варианта с максимальным значением  $\psi_j^{\max}$ , вычисляется как разность между  $\psi_j^{\max}$  и  $\psi_j$ . Выбирается вариант с минимальной суммой компромиссов участников –  $\min \sum_{j=1}^N (\psi_j^{\max} - \psi_j)$ .

Рассмотрим иллюстративный пример выбора компромиссного решения. Участники проекта (заинтересованные стороны) рассматривают четыре варианта реализации инвестиционного проекта производства инновационного зарубежного локомотива с различной степенью локализацией на территории РФ. Каждый участник оценивает представленные варианты по десятибалльной шкале в соответствии со своими предпочтениями.

Таблица 3. Оценка эффективности вариантов для участников

Участник проекта	Вариант локализации			
	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)	4 (100%)
Государство	2	5	8	10
Лицензиар	10	5	7	4
Инвестор	6	10	8	5
ОАО РЖД	3	6	10	6

В таблице 3 приведены результаты оценки эффективности варианта для участников. Из приведенных данных видно, что варианты, соответствующие максимальному предпочтению каждого участника, не совпадают.

В таблице 4 приведены результаты оценки степени компромисса участников при выборе варианта проекта локализации. Чем больше это значение, тем выше уровень компромисса.



В данном случае следует выбрать вариант проекта локализации **3 (75%)**, который соответствует минимальной сумме компромиссов участников проекта.

Таблица 4. Оценка степени компромисса участников проекта и выбор варианта локализации

Участник проекта	Вариант локализации			
	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)	4 (100%)
Государство	8	5	2	0
Лицензиар	0	5	3	6
Инвестор	4	0	2	5
ОАО РЖД	7	4	0	4
$\min \sum_{j=1}^N (\psi_j^{\max} - \psi_j)$	19	14	7	15

Одним из крупнейших проектов по локализации производства в отрасли транспортного машиностроения в настоящее время является проект производства новых электропоездов, организованного на ООО «Уральские локомотивы» (совместное предприятие Группы Синара и Сименс АГ).

Учитывая интересы российских участников проекта, удалось заключить контракт с Сименс АГ, который предусматривает условия достижения локализации производства комплектующих на уровне 55% (на начало производства), а к 2017 году – на уровне 80%.

Для реализации этого проекта на базе «ООО «Уральские локомотивы» в конце 2013 года завершено строительство производственного комплекса общей площадью 90 тыс. кв. м. Кроме этого в производстве комплектующих компонентов будут участвовать более 80 российских предприятий. При этом в рамках машиностроительного кластера Свердловской области будет создано более 10 тыс. новых рабочих мест [9].

Внедрение инновационных технологий и проектных решений Сименс АГ, включая модульную конструкцию электропоез-

да, изготовление кузова из экструдированных алюминиевых профилей, использование пневмоподвески и энергопоглощающих крэш-элементов для кузова вагона, позволяет повысить безопасность эксплуатации и снизить затраты на техническое обслуживание техники.

По оценкам вице-президент ОАО РЖД Валентина Гапановича, в результате реализации проекта отпускная стоимость электропоездов для потребителей будет снижена на 20% по сравнению с базовой стоимостью закупки аналогичной техники в Германии, а стоимость жизненного цикла техники снизится на 25% [9].

## **5. Заключение**

В статье предложен подход и постановка задачи выбора параметра «степень локализации» при трансфере высокоэффективных западных транспортных технологий. Актуальность постановки и решения данной задачи обусловлена важностью оптимизации процессов модернизации промышленного производства в России, освоения российскими предприятиями производства инновационных и высокоэффективных образцов техники и технологии. Как было показано ранее, существенный прогресс в этом направлении наблюдается в области транспортного машиностроения России, в частности, в интересах крупнейшей российской компании ОАО РЖД.

Предложен метод решения задачи выбора образца и варианта локализации его производства на российской территории, который включает определение минимальной цены образца при выполнении заданных ограничений задачи. Метод включает также определение составных частей эксплуатационных затрат на протяжении жизненного цикла образца и расчет интегрального показателя «стоимость жизненного цикла», который используется для окончательного выбора образца и параметров локализации его производства.

Показано, что минимальная стоимость жизненного цикла образца зависит от достижения компромисса, при котором эффективность проекта с точки зрения его участников удовле-

творяет заданным требованиям. Данный тип инвестиционных проектов относится к многоцелевым проектам, каждый участник проекта преследуют свои цели, эффективность достижения которых должна быть оценена. Предложена схема согласования интересов участников проекта, основанная на модели минимизации суммы компромиссов.

Приведены числовые примеры, иллюстрирующие существо исследуемой задачи и предлагаемые методы ее решения.

### Литература

1. АКИНФИЕВ В.К. *Управление развитием интегрированных промышленных компаний: теория и практика (на примере черной металлургии)*. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 224 с.
2. АКИНФИЕВ В.К., ЦВИРКУН А.Д. *Проблемы управления инвестициями. Программный комплекс «ТЭО-ИНВЕСТ» // Проблемы управления*. – 2013. – №3. – С. 32–40.
3. *Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» (№2459р от 27.12.2007)*.
4. *Программа инновационного развития ОАО «РЖД» на период до 2015 года. Утверждена Советом директоров ОАО «РЖД» (протокол №13 от 24.06.2011)*.
5. ЦВИРКУН А.Д., АКИНФИЕВ В.К. *Бизнес-план. Анализ инвестиций. Методы и инструментальные средства*. – М.: Ось-89, 2009. – 320 с.
6. BORDLEY R.F. *Combining the opinions of experts who partition events differently // Decision Anal.* – 2009. – Vol. 6(1). – P. 38–46.
7. KEENEY R.L. *Foundations for group decision analysis // Decision Anal.* – 2013. – Vol. 10(2). – P. 103–120.
8. KEISLER J. *Value of information in portfolio decision analysis // Decision Anal.* – 2004. – Vol. 1(3). – P. 177–189.
9. *СМИ об РЖД*. [Электронный ресурс]. – URL: [http://press.rzd.ru/smi/public/ru?STRUCTURE\\_ID=2&layer\\_id=5050&id=276516](http://press.rzd.ru/smi/public/ru?STRUCTURE_ID=2&layer_id=5050&id=276516) (дата обращения: 08.03.2014).

## INVESTMENT PORTFOLIO PROBLEM FOR FOREIGN TECHNOLOGY TRANSFER IN TRANSPORT MACHINE BUILDING INDUSTRY

**Valerij Akinfiyev**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (*akinf@ipu.ru*).

*Abstract: We consider a problem of selecting the “degree of localization” for the process of transferring the world-best technologies in the area of transport machine building. Investment projects of this sort may have different purposes; their participants may have conflicting and informally defined interests. We suggest a scheme for project participant interests’ coordination, which is based on the method of minimizing the sum of trade-offs.*

Keywords: transfer of foreign technology, degree of localization, multi-purpose investment projects.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.В. Клочковым*

*Поступила в редакцию 06.11.2014.  
Опубликована 31.03.2014.*

УДК 004.5 + 004.588  
ББК 32.973.26-018.2

## **К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКЕ РЕШЕНИЙ ОДНОГО КЛАССА ЗАДАЧ В СЛЕДЯЩИХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ**

**Смирнова Н. В.<sup>1</sup>**

*(ФГБУН Институт проблем управления РАН, Москва)*

*Рассматриваются обучающие программы, обеспечивающие интерактивную поддержку процесса решений задач предметов естественнонаучного цикла и их автоматизированную оценку. Описывается алгоритм выявления зависимостей между формулами, посредством которых представляются сведения об известных решениях учебной задачи, и формулой, введенной обучаемым, позволяющий в ряде случаев определить, является ли введенная обучаемым формула верным шагом в решении задачи или его имитацией. Данный алгоритм является частью алгоритма измерения прогресса в решении задачи.*

Ключевые слова: следящая интеллектуальная обучающая система, автоматизированная обучающая система, автоматическая проверка решений, дерево и/или, символьные вычисления

### **1. Введение**

Следящими интеллектуальными обучающими системами (следящими ИОС, англ. model-tracing intelligent tutoring systems) называются программы, предназначенные для обучения предметам естественнонаучного цикла, обеспечивающие интерактивную поддержку процесса решения задач обучаемым и автоматизированную оценку его решений. Название «следящие

---

<sup>1</sup> *Наталья Викторовна Смирнова, научный сотрудник (smirnovanatalia2008@gmail.com).*

ИОС» обусловлено тем, что для проверки хода решения обучаемого на завершенность и правильность необходимо сверять шаги решения обучаемого с шагами имеющихся в ИОС решений. На рис. 1 в качестве примера следящей ИОС представлен скриншот интерфейса прототипа обучающей системы, разработанного в лаборатории 17 ИПУ РАН (в подсистеме проверки решений разработанного прототипа используется «наивный» способ измерения прогресса в решении, подробнее о нем в следующем разделе статьи).

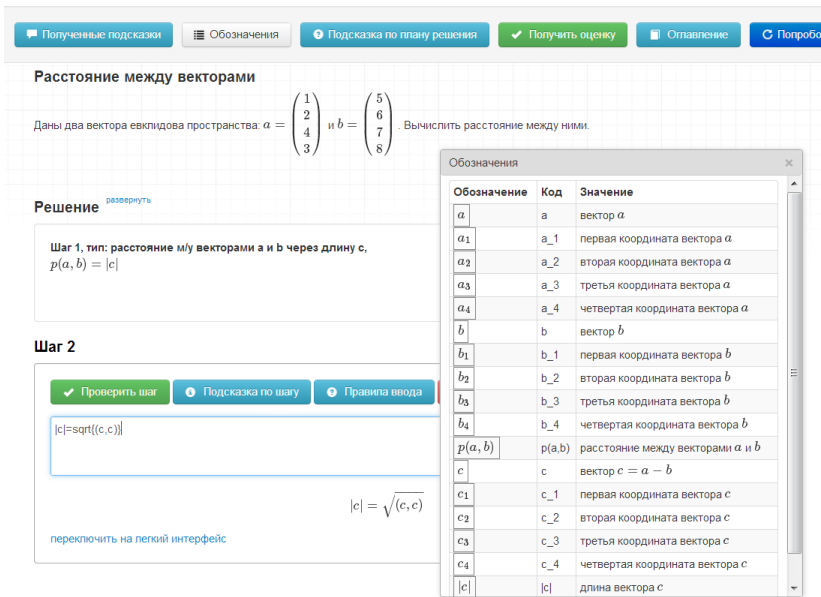


Рис. 1. Скриншот интерфейса решения задачи следящей ИОС «Волга»

К одному из наиболее распространенных типов следящих ИОС относятся программы, в которых в качестве решения требуется ввести одну формулу или заполнить текстовые поля, соответствующие недостающим частям некоторой формулы. Примером такой системы является STACK [11]: подсистема, разработанная для автоматического оценивания заданий по

алгебре и началам анализа [12], которая может быть интегрирована в другие обучающие среды, например, в Moodle [10]. Также в качестве примера подобных систем можно упомянуть ActiveMath [9] и ряд электронных учебников по школьной математике, созданных на основе работ М.А. Левинской [3].

По-видимому, наиболее развитой программой, в которой реализована проверка решений, вводимых в достаточно свободной форме, является Andes Physics Tutor [13, 17]. В следующих разделах статьи будет подробно описана подсистема проверки решений Andes Physics Tutor. В этой подсистеме важную роль играет алгоритм определения того, от каких формул из формул, посредством которых представляются сведения об известных решениях учебной задачи, зависит формула, введенная обучаемым. В данной работе предлагается альтернативный алгоритм выявления зависимостей между формулами, который, в отличие от алгоритма, реализованного в Andes Physics Tutor, способен обрабатывать формулы, содержащие векторы и матрицы, а также потенциально является менее уязвимым к имитации правильно введенных шагов решения.

## **2. Постановка задачи**

Далее рассматриваются определенные формальные задачи на нахождение искоемых объектов (см. классификацию учебных задач в [7]). При этом предполагается, что:

1) решение обучаемого состоит из ряда формул и не содержит естественно-языковых вставок;

2) при вводе формул студент может использовать только те обозначения, которые внесены в программу автором курса для данной задачи и не может вводить свои обозначения (см. рис. 1);

3) известные решения рассматриваемых задач состоят только из таких формул, которые могут быть проверены без привлечения сведений о других формулах, ранее введенных обучаемым (к примеру, этому условию не удовлетворяют задачи, для решения которых необходимо решать систему уравнений методом Гаусса).

Разработчики Andes Physics Tutor предложили осуществлять проверку шага решения студента в два этапа (шагу решения, как правило, соответствует одна формула, введенная с использованием LaTeX-подобного синтаксиса). На первом этапе осуществляется верификация шага, т.е. первичная проверка шага. Если шаг успешно верифицируется, то далее запускается алгоритм измерения прогресса в решении.

Верификация шага решения осуществима с помощью простого эвристического алгоритма. Например, в Andes Physics Tutor используется прием «color by numbers», заключающийся в следующем. В формулу, введенную обучаемым, подставляются значения содержащихся в ней переменных. Далее выполняется проверка на равенство обеих частей получившегося выражения. Известно, что использовании такого способа проверки некорректность подвыражений в формуле, введенной обучаемым, может быть не выявлена, если они умножаются на выражение, которое равно 0. В Andes Physics Tutor предусмотрены специальные эвристики для выявления подобных случаев. В процессе проверки на равенство двух выражений осуществляется упрощение выражений. Для упрощения выражений используются библиотеки символьных вычислений (примером такой библиотеки является SymPy [8]).

Проблема измерения прогресса в решении представляет большой интерес. Наиболее простой способ ее решения заключается в представлении каждого известного решения задачи в виде списка формул и организации сравнения формулы, введенной обучаемым, с формулами из этих списков. Этот способ плох тем, что даже для самой простой задачи требуется ввести слишком много формул и решений, многие из которых незначительно отличаются друг от друга. Так, например, для задачи «Решение квадратного уравнения» автором в прототип обучающей системы, в котором использовался «наивный» способ измерения прогресса в решении, было введено 16 решений, при том, что были учтены не все подходы к решению этой задачи. Иными словами, при использовании этого способа возникает проблема множественности эквивалентных комбинаций формул (МЭКФ), генерируемых обучаемыми при решении задач.



Для иллюстрации работы описываемых в статье алгоритмов будет использоваться следующая задача.

**Задача.**

*Дано: векторы евклидова пространства*

$$a = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

*Вычислить расстояние между  $a$  и  $b$ .*

Часть решений данной задачи может быть сгенерирована на основе следующих формул:

(1)  $p(a, b) = |c|$ ;

(2)  $|c| = \sqrt{(c, c)}$ ;

(3)  $(c, c) = c_1^2 + c_2^2$ ;

(4)  $c = a - b$ ;

(5)  $c = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$ ;

(6)  $a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$ ;

(7)  $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$ ;

(8)  $a_1 = 1$ ;

(9)  $a_2 = 2$ ;

(10)  $b_1 = 3$ ;

(11)  $b_2 = 4$ .

Поясним проблему МЭКФ на примере этой задачи. Комбинация формул сводится к замене величин в одной формуле алгебраическими выражениями, полученными из других формул, участвующих в комбинации. Например, комбинация формул (1) и (2) имеет вид:

$$p(a, b) = \sqrt{(c, c)},$$

а комбинация формул (1)–(3) такова:

$$p(a, b) = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}.$$

Можно представить себе много возможных решений задачи: решение, содержащее формулы (1), (2) и (3); решение, содержащее формулу (1) и комбинацию формул (2) и (3); решение, содержащее комбинацию формул (1)–(3) и т.д. Более эффективной оказывается такая архитектура обучающей системы, при использовании которой автор курса для каждой задачи вносит

- формулы, на основе которых могут быть сгенерированы все известные ему решения и подсказки к ним (будем для краткости называть их «базовыми»);
- известные величины и их значения («дано...»);
- искомые величины («найди...»),

а известные ему решения генерируются системой автоматически. Измерение прогресса в решении может быть реализовано примерно следующим образом. При проверке шага решения обучаемого

1) выявляется, на основе каких «базовых» формул могла бы быть получена введенная обучаемым формула (т.е. какие «базовые» формулы обучаемый скомбинировал для ее получения, другими словами, от каких «базовых» формул зависит формула, введенная обучаемым);

2) соответствующие «базовые» формулы ищутся в сгенерированных решениях и помечаются как использованные обучаемым при решении задачи;

3) для каждого  $i$ -го сгенерированного решения задачи вычисляется степень прогресса  $PR_i$ , равная отношению количества использованных обучаемым формул к количеству всех формул, присутствующих в решении;

4) в качестве текущего значения прогресса обучаемого выбирается максимальное значение  $PR_i$ .

При рассмотрении данной архитектуры подсистемы проверки решений ИОС может возникнуть несколько вопросов. В-первых, вопрос о том, каким образом и кем контролируется полнота списка «базовых» формул. В качестве ответа на этот вопрос процитируем [5]: «одним из наиболее надежных считается метод постепенного пополнения и изменения базы знаний, причем поводом к изменению является каждый случай, когда

система не смогла решить задачу или решила ее неправильно». Так, например, можно в интерфейс ввода решения задачи добавить кнопку «Пожаловаться». Обучаемый нажимает на эту кнопку, если уверен в том, что система несправедливо не засчитала его шаг решения как правильный. Тогда шаг решения обучаемого временно засчитывается, а также формируется специальный отчет для преподавателя, на основе которого преподаватель может не только изменить оценку за задачу, но и принять решение о необходимости пополнения соответствующего списка «базовых» формул.

Во-вторых, может возникнуть вопрос о том, каким образом выявляется подмножество «базовых» формул, от которых зависит формула, введенная обучаемым. Этому вопросу и посвящена данная статья. В разделе 3 описывается известный алгоритм выявления зависимостей между «базовыми» формулами и формулой, введенной обучаемым, реализованный в Andes Physics Tutor, а в разделе 4 – алгоритм выявления зависимостей между формулами, предлагаемый автором.

Список «базовых» формул, представляющий известные решения приведенной выше задачи, не является полным. Это связано с тем, что при его составлении были учтены не все возможные решения этой задачи. При наличии более полного списка «базовых» формул результаты работы обоих алгоритмов выявления зависимостей будут содержать зависимости, выявленные при использовании менее полного списка. Поэтому в данной работе можно ограничиться имеющимся списком «базовых» формул.

Описываемые в статье алгоритмы имеют программную реализацию (см. [14–15]). Отметим, что для алгоритма Andes Physics Tutor необходима библиотека SymPy версии 0.7.2, а для предлагаемого алгоритма – SymPy версии 0.7.3. Стабильная версия предлагаемого алгоритма находится в ветке master, а самые последние доработки – в ветке develop.

### **3. Алгоритм выявления зависимостей между «базовыми» формулами и формулой, введенной обучаемым, реализованный в Andes Physics Tutor**

В Andes Physics Tutor шаги решения, вводимые обучаемыми, рассматриваются с точки зрения уравнений и зависимостей между ними. Если уравнение, введенное обучаемым, является линейной комбинацией предыдущих введенных им уравнений, значит, оно является лишь повторением уже введенных шагов решения. Знание о линейной зависимости уравнения, введенного обучаемым, и некоторых уравнений из списка «базовых» для этой задачи уравнений свидетельствует о том, что обучаемый при вводе шага решения мог использовать именно эти уравнения (в общем случае может быть выявлено несколько вариантов зависимостей между формулой, введенной обучаемым, и различными подмножествами «базовых» формул).

Зависимость уравнений, в случае, когда все уравнения линейны, имеет место, если нормаль к гиперплоскости, задаваемой уравнением, введенным обучаемым, является линейной комбинацией нормалей гиперплоскостей, задаваемых остальными уравнениями. В нелинейном случае вместо коэффициентов каждого уравнения используются координаты его градиента, в котором все переменные заменены на числовые значения.

Рассмотрим этот алгоритм на примере задачи вычисления расстояния между векторами (см. раздел 2). Поскольку данным алгоритмом не предусматривается обработка формул, содержащих векторы и матрицы, то в качестве списка «базовых» уравнений возьмем формулы (1)–(3), формулы (8)–(11) и формулы

$$(12) \quad c_1 = a_1 - b_1,$$

$$(13) \quad c_2 = a_2 - b_2.$$

Пусть обучаемый ввел такую формулу:

$$(14) \quad p(a, b) = \sqrt{(c, c)}.$$

Для того чтобы определить, какие формулы использовал обучаемый для вывода формулы (14), составим таблицу 1. Строки таблицы 1 соответствуют градиентам всех рассматрива-

емых формул в точке, координаты которой равны числовым значениям переменных из условий задачи.

Таблица 1. Градиенты «базовых» уравнений и формулы, введенной обучаемым, в точке, соответствующей решению задачи

Формула $f$	$grad f \Big _{\substack{p(a,b)=\sqrt{8},(c,c)=8, c =\sqrt{8},c_1=-2, \\ a_1=1,b_1=3,c_2=-2,a_2=2,b_2=4}}$
$p(a,b)- c $	$A = [1.0, 0, -1.0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$
$c_1 - a_1 + b_1$	$B = [0, 0, 0, 1.0, -1.0, 1.0, 0, 0, 0]$
$c_2 - a_2 + b_2$	$C = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.0, -1.0, 1.0]$
$ c  - \sqrt{(c,c)}$	$D = [0, -0.18, 1.0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$
$(c,c) - c_1^2 - c_2^2$	$E = [0, 1.0, 0, 4.0, 0, 0, 4.0, 0, 0]$
$a_1 - 1$	$F = [0, 0, 0, 0, 1.0, 0, 0, 0, 0]$
$a_2 - 2$	$G = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.0, 0]$
$b_1 - 3$	$H = [0, 0, 0, 0, 0, 1.0, 0, 0, 0]$
$b_2 - 4$	$I = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.0]$
$p(a,b) - \sqrt{(c,c)}$	$J = [1.0, -0.18, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$

Далее решается система уравнений

$$(15) \alpha A + \beta B + \chi C + \delta D + \varepsilon E + \phi F + \varphi G + \gamma H + \eta I = J .$$

Решением данной системы уравнений является вектор с 9 координатами, равными 0, кроме первой и четвертой координаты (они равны 1). Это означает, что для вывода формулы (14) обучаемый использовал формулы из 1 и 4 строки таблицы 1, т.е. формулы (1) и (2).

В случае, когда при поиске зависимостей получается переопределенная система, далее путем комбинаторного перебора подмножеств уравнений этой системы генерируются квадратные системы уравнений. В случае успешного решения каждой полученной таким образом системы запоминается полученный вариант зависимости между формулами.

Если в результате работы алгоритма формируется несколько вариантов зависимостей между «базовыми» формулами и формулой, введенной обучаемым, то для выбора варианта, наиболее соответствующего мысленному пути, проделанному обучаемым, далее используются дополнительные эвристики. К сожалению, разработчики Andes Physics Tutor лишь упоминают о существовании таких эвристик и не приводят их подробного описания.

Формула (14) соответствует шагу обучаемого в наиболее благоприятной для выявления зависимостей между формулами форме, поскольку в ней ни одна переменная из условия задачи не была заменена на соответствующее числовое значение. Очевидно, что чем больше переменных заменено на числовые значения и чем более вычислительно свернутой является формула, введенная обучаемым, тем большая неопределенность имеет место при выявлении зависимостей между формулами. Посмотрим, к каким результатам приводит использование вышеописанного алгоритма в случаях, когда в формуле, введенной обучаемым, часть переменных заменена на числовые значения.

### ПРИМЕР 3.1.

Пусть обучаемый ввел формулу

$$(16) (c, c) = (a_1 - b_1)^2 + 4.$$

Алгоритм выдаст правильный результат: формулы (3), (9), (11), (12), (13).

### ПРИМЕР 3.2.

Пусть обучаемый узнал, что  $(c, c) = 8$  (подобная ситуация может возникнуть в компьютерном классе после разговора между двумя сидящими рядом студентами) и ввел формулу

$$(17) (c, c) = 16/2.$$

Формула (17) корректна, но не может быть засчитана как шаг решения задачи. Она лишь является его имитацией. Между тем, алгоритм покажет, что при выводе формулы (17) обучаемый использовал формулы (3), (8)–(13).

### ПРИМЕР 3.3.

Пусть обучаемый узнал, что  $(c, c) = 8$  и  $(c, c)$  некоторым образом зависит от  $c_1, c_2$  и ввел формулу

$$(18) (c, c) = c_1 + c_2 + 12.$$

Поскольку  $c_1 = -2, c_2 = -2$ , то формула корректна, хотя и не может быть засчитана как шаг решения задачи. Между тем, алгоритм покажет, что обучаемый использовал формулу (3).

Как показывают примеры 3.2–3.3, в случаях, когда в формуле, введенной обучаемым, часть переменных заменена на числовые значения, алгоритм измерения прогресса в решении, реализованный в подсистеме проверки решений Andes Physics Tutor, становится *уязвимым* для имитации правильно введенных шагов решения.

## **4. Предлагаемый алгоритм выявления зависимостей между «базовыми» формулами и формулой, введенной обучаемым**

Осознанное решение любых учебных задач включает в себя анализ ситуации и выполнение некоторой последовательности вычислительных действий, в ходе выполнения которых обучаемый находит значения ряда величин, устанавливающих связь между искомыми и известными величинами. Будем называть *целевыми*

- величины, которые связывают искомые и известные величины;
- величины, соответствующие искомым объектам.

Так, для рассматриваемой задачи искомой величиной является  $p(a, b)$ , известными величинами –  $a_1, a_2, b_1, b_2$ , целевыми величинами –  $p(a, b), |c|, (c, c), c, c_1, c_2$ .

Будем считать, что предлагаемый алгоритм работает на множестве тех формул, которые для данной задачи указал автор курса, а не на множестве всех формул в базе знаний обучающей системы. Кроме того, будем считать, что каждая «базовая» формула соответствует одному из следующих случаев:

- вычисление некоторой целевой величины (вида  $x = \langle \text{символьное выражение} \rangle$ );
- формула, связывающая обозначение вектора с обозначениями его координат (вида  $x = (x_1 \dots x_n)$ );
- определение известной величины (вида  $x = \langle \text{число} \rangle$ ).

Для рассматриваемой задачи (см. раздел 2 статьи) допустимыми «базовыми» формулами являются формулы (1)–(11). Эти ограничения позволяют снизить вычислительную сложность предлагаемого алгоритма.

В программе каждая «базовая» формула представляется посредством такой структуры данных, как «соотношение вычислимости». Этот термин, а также его содержательный смысл были задействованы из раздела работы [1], посвященного применению логических методов к интеллектуализации обучающих систем. Например, «базовая» формула (3) представляется соотношением вычислимости со следующими значениями свойств:

- известные величины (обозн. *known\_variables*):  $c_1, c_2$ ;
- целевая величина (обозн. *goal\_variable*):  $(c, c)$ ;
- формула (обозн. *formula\_text*):  $(c, c) = c_1^2 + c_2^2$ .

В разработанной программе соотношения вычислимости представляются классами со свойствами следующих типов: строка, список, элементами которого являются строки<sup>1</sup>. На рис. 2 представлен фрагмент кода разработанной программы, из которого можно получить информацию о том, как вносятся сведения, необходимые для автоматизированной проверки учебной задачи в ИОС.

Закрепим за каждым соотношением вычислимости идентификационный номер (в статье считается, что идентификационный номер соотношения вычислимости соответствует порядковому номеру «базовой» формулы). Для удобства записи будем обозначать  $calc(x)$  соотношение вычислимости с идентификационным номером  $x$ .

---

<sup>1</sup> Список – абстрактный тип данных, представляющий собой упорядоченный набор значений, в котором некоторое значение может встречаться более одного раза.



```
def testName(self):
    #enter info about "basic" formulas for solutions generation and checking students' input
    calc_relations = []
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('|c|', ['p(a,b)'], 'p(a,b)=|c|'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('p(a,b)', ['|c|'], 'p(a,b)=|c|'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('|c|', ['(c,c)'], '|c|=sqrt((c,c))'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('(c,c)', ['|c|'], '|c|=sqrt((c,c))'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('(c,c)', ['c_1', 'c_2'], '(c,c)=c_1^2+c_2^2'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('c', ['a', 'b'], 'c=a-b'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('c', ['c_1', 'c_2'], 'c=[c_1;c_2]'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('a', ['a_1', 'a_2'], 'a=[a_1;a_2]'))
    calc_relations.append(calc.CalcRelation('b', ['b_1', 'b_2'], 'b=[b_1;b_2]'))
    notations = ['a', 'a_1', 'a_2', 'a_3', 'a_4', 'b', 'b_1', 'b_2', 'b_3', 'b_4', 'p(a,b)', 'c', 'c_1',
    solution_point = {'a_1': 1, 'b_1': 3, 'a_2': 2, 'b_2': 4, 'c_1': -2, 'c_2': -2, 'c,c': 8}
    vectors = ['c', 'a', 'b']
    sought_variable = 'p(a,b)'
    known_variables = ['a_1', 'a_2', 'b_1', 'b_2']
```

Рис. 2. Пример того, как вносятся сведения, необходимые для автоматизированной проверки учебной задачи в ИОС

На основе соотношений вычислимости автоматически строятся деревья И/ИЛИ (подробнее о дереве И/ИЛИ см. [4]). Для рассматриваемой задачи строится два дерева И/ИЛИ. В данном разделе опишем их внешнее представление и использование, их внутреннее представление и алгоритм построения по имеющимся соотношениям вычислимости см. в следующем разделе статьи. Деревья И/ИЛИ, построенные для рассматриваемой задачи, можно представить следующим образом (см. рис. 3). В обоих деревьях рассматриваемой учебной задачи присутствуют только И-узлы.

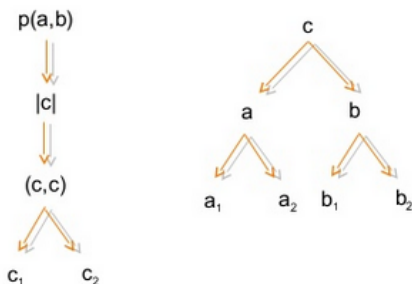


Рис. 3. Деревья И/ИЛИ, посредством которых представляется информация об известных решениях рассматриваемой учебной задачи

Узлам каждого дерева соответствуют целевые величины, листьям – известные величины или величины, являющиеся координатами некоторой целевой величины (например,  $c_1$  и  $c_2$  являются координатами целевой величины  $c$ ). Каждое ребро дерева соединяет одну целевую величину с одной или несколькими целевыми величинами и/или известными величинами. Каждому ребру дерева соответствует одно (И-узел) или несколько соотношений вычислимости (ИЛИ-узел).

На основе И/ИЛИ деревьев генерируются все известные решения задачи. Эти решения могут состоять из нескольких частей. Для каждой части решения запоминаются не только номера соотношений вычислимости, но и целевые величины, которые вычисляются по ходу этой части решения. Для рассматриваемой задачи формируется одно решение, состоящее из двух частей:

**Часть 1.**

- соотношения вычислимости: 1, 2, 3;
- целевые величины:  $p(a,b)$ ,  $|c|$ ,  $(c,c)$ .

**Часть 2.**

- соотношения вычислимости: 4, 6, 7;
- целевые величины:  $c$ ,  $a$ ,  $b$ .

Посредством  $F_{st}$  обозначается формула, которую ввел обучаемый, посредством  $N_r$  – величины в правой части этой формулы. Будем рассматривать случай, когда в  $F_{st}$  имеется только один знак « $\Leftarrow$ » и в левой ее части (считаем, что  $F_{st}$  делится знаком « $\Leftarrow$ » на левую и правую части) находится только одна величина. Если шаг решения обучаемого не удовлетворяет данному условию, то можно привести его к требуемой форме с помощью эвристик, задействующих библиотеку символьных вычислений.

Предлагаемый алгоритм не только выявляет зависимости между  $F_{st}$  и «базовыми» формулами, но и в некоторых случаях обнаруживает факты имитации правильно введенных шагов решения. Идея алгоритма заключается в следующем.

**Шаг 1.** На основе каждого решения, имеющего часть, в списке целевых величин которой присутствует величина из левой части  $F_{st}$ , генерируется выражение. В правой части

полученного выражения все величины, кроме тех, что присутствуют в правой части  $F_{sb}$ , заменяются на числовые значения (т.е. воспроизводится мысленный путь обучаемого – вывод введенной им формулы).

**Шаг 2.** Выражения, полученные на шаге 1, сравниваются с  $F_{st}$ . Если найдется хоть одно выражение  $e$ , эквивалентное  $F_{sb}$ , то это означает, что обучаемый ввел правильный шаг и при этом мог использовать соотношения вычислимости из соответствующих частей того решения, на основе которого было сгенерировано  $e$ . Если не найдется ни одного такого выражения, то это означает, что обучаемый мог сымитировать шаг решения или что в базе знаний обучающей системы отсутствуют некоторые «базовые» формулы.

Генерация выражения начинается с индекса  $I_0$ , соответствующего индексу целевой величины, совпавшей с величиной из левой части  $F_{st}$ . Во время генерации выполняются следующие операции: получение соотношений вычислимости по идентификационному номеру; обращение к свойствам соотношений вычислимости; поиск и замена строковых величин. В терминах алгоритмов поиска в пространстве состояний (англ. state space search) текущее состояние решаемой задачи генерации выражения задается с помощью следующих переменных:  $E^i$  – выражение;  $N^i$  – величины в правой части  $E^i$ ;  $U^i$  – соотношения вычислимости, использованные для генерации выражений  $E^1, \dots, E^i$ . Условие остановки генерации выражения таково: достигнут конец решения или  $N^i \supseteq N_r$ .

Иногда для генерации одного выражения приходится генерировать несколько выражений, унифицировать их и, комбинируя некоторые выражения, формировать результирующее выражение (см. пример 4.1).

Перед началом работы алгоритма все обозначения задачи сортируются по длине и последовательно заменяются в  $F_{st}$ , соотношениях вычислимости и списках целевых величин частей решений на обозначения вида  $x1y, \dots, xly$ . Это позволяет не только избежать нежелательных коллизий при выполнении операций поиска и замены строк (например, может возникнуть

коллизия у обозначений  $p(a, b)$ ,  $a, b$ ), но и эффективно вставлять забытые обучаемым знаки умножения.

Напомним, что предлагаемый алгоритм запускается только в том случае, если шаг решения обучаемого прошел верификацию. Если на шаге 2 алгоритма не найдется выражения, эквивалентного  $F_{st}$ , то, если исключить версию о недостающих «базовых» формулах в базе знаний, весьма маловероятно, что обучаемый ввел без злого умысла формулу, которая все же смогла пройти верификацию, поэтому версия о неправильно введенном шаге решения не рассматривается.

Что касается известных проблем алгоритмической неразрешимости массовой задачи эквивалентности термов (равенства слов), то еще в 1970-х гг. (В.М. Глушков и др.) отмечалась полезность понятия практической разрешимости, учитывающей эвристики и вычислительную сложность задач, в сравнении с зачастую практической неразрешимостью ряда теоретически разрешимых задач. Кроме того, практический опыт разработчиков следящих ИОС, упомянутых во введении данной статьи, а также опыт автора свидетельствуют о том, что в подавляющем большинстве случаев проверок решений не слишком сложных учебных задач упрощение разности выражений с использованием достаточно развитых инструментов символьных вычислений будет успешно осуществлено.

Проиллюстрируем работу предлагаемого алгоритма на примерах.

#### *ПРИМЕР 4.1.*

Пусть обучаемый ввел формулу

$$(19) (c, c) = (a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2.$$

Алгоритмом генерируется выражение, эквивалентное формуле (19), поэтому делается вывод о том, что обучаемый ввел правильный шаг, используя «базовые» формулы соотношений вычислимости 3, 4, 6, 7 из Части 1 и Части 2 Решения 1. Эквивалентность выражений в разработанной программе проверяется с задействованием модуля `sympy.simplify` библиотеки `SymPy`.

В ходе работы алгоритма в данном случае в том числе выполняется следующая последовательность шагов.

**Шаг 1.** Выясняется, что можно вычислить  $(c, c)$  с помощью Части 1 Решения 1. Генерируется выражение

$$(c, c) = c_1^2 + c_2^2.$$

Поскольку невозможно «продвинуть» состояние решаемой задачи генерации выражения дальше, а условие остановки не выполнено, то проверяется, не являются ли  $c_1$  и  $c_2$  координатами некоторого вектора (напомним, что для каждой учебной задачи автором курса также задается список векторов, см. рис. 2).

**Шаг 2.** Поскольку  $c_1$  и  $c_2$  являются координатами вектора  $c$ , происходит поиск части решения, на основе которой можно вычислить  $c$  (это Часть 2). Генерируется выражение для вектора  $c$ , которое имеет вид

$$c = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}.$$

**Шаг 3.** С помощью модуля `sympy.unify` происходит сопоставление выражения, сгенерированного для нахождения вектора  $c$  и определения вектора  $c$  через его координаты, т.е. сопоставляются выражения

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \text{ и } \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}.$$

Выясняется, что

$$c_1 = a_1 - b_1, c_2 = a_2 - b_2.$$

Полученные замены подставляются в выражение, полученное на шаге 1. К списку номеров соотношений вычислимости, найденных на шаге 1, добавляются номера, найденные на шаге 3. Полученный таким образом список номеров соотношений вычислимости возвращается алгоритмом в качестве найденной зависимости между «базовыми» формулами и формулой, введенной обучаемым.

#### *ПРИМЕР 4.2.*

Пусть обучаемый ввел формулу

$$(c, c) = c_1 + c_2 + 12.$$

В результате работы алгоритма будет сгенерировано выражение

$$(c, c) = c_1^2 + c_2^2.$$

Сгенерированное выражение окажется неэквивалентным формуле, введенной обучаемым, и шаг решения обучаемого (в отличие от алгоритма Andes Physics Tutor) будет помечен алгоритмом как подозрительный.

#### *ПРИМЕР 4.2.*

Пусть обучаемый ввел формулу

$$(c, c) = 16 / 2.$$

Будет сгенерировано выражение

$$(c, c) = (1 - 3)^2 + (2 - 4)^2.$$

эквивалентное формуле, введенной обучаемым – т.е. имитация правильно введенного шага будет не выявлена.

### **5. Алгоритм построения дерева И/ИЛИ по имеющимся соотношениям вычислимости**

В разработанной программе деревья И/ИЛИ представляются посредством словарей, элементами которых являются списки списков<sup>1</sup>. В рассматриваемой задаче деревья И/ИЛИ имеют следующий вид:

#### **Дерево 1.**

$$\{0: [[[[1]]]], 1: [[[[2]]]], 2: [[[[3]]]]\}.$$

#### **Дерево 2.**

$$\{0: [[[[4]]]], 4: [[[[6, 7]]]]\}.$$

Ключ 0 обозначает корень дерева, остальные ключи соответствуют идентификационным номерам некоторых соотношений вычислимости. В общем случае элементы дерева выглядят

---

<sup>1</sup> Словарь – структура данных, в которой, в отличие от массива, доступ к элементам производится по ключу. Словарь – неупорядоченное множество пар вида ключ: значение с требованием уникальности ключей в пределах одного словаря.

следующим образом:  $x: [[e_1], \dots, [e_n]]$ , где  $e_i$  имеет вид  $[[z_{11}, \dots, z_{1m}], \dots, [z_{p1}, \dots, z_{pr}]]$ . Обозначения  $z_{11}, \dots, z_{1m}, \dots, z_{p1}, \dots, z_{pr}$  соответствуют идентификационным номерам некоторых соотношений вычислимости.

Каждый элемент дерева отражает такую информацию: для нахождения  $i$ -й переменной из  $calc(x).known\_variables$  требуется применить соотношения вычислимости  $z_{11}, \dots, z_{1m}$ , или  $\dots$ , или соотношения  $z_{p1}, \dots, z_{pr}$ .

Процесс построения дерева И/ИЛИ включает два основных этапа: генерация веток и формирование поддеревьев. На заключительном этапе из поддеревьев собирается требуемое дерево (путем их объединения). В разработанной программе ветки дерева И/ИЛИ представляются посредством списков, элементами которых являются целые числа. То есть ветка дерева И/ИЛИ имеет вид  $[x, y]$ , где  $x$  и  $y$  – идентификационные номера некоторых соотношений вычислимости. Ветка  $[x, y]$  отражает информацию о том, что для вычисления одной из  $calc(x).known\_variables$  нужно использовать соотношение вычислимости  $calc(y)$ .

**Генерация веток** осуществляется с помощью структур данных *Path* со следующими свойствами:

- $S^i$  – текущее состояние (представляет собой некоторое подмножество обозначений задачи);
- *Index* – идентификационный номер использованного соотношения вычислимости.

В начале работы алгоритма ищутся соотношения вычислимости  $calc(x)$  такие, что  $calc(x).goal\_variable$  совпадает с искомой величиной задачи (если искомым величин несколько, то описываемый ниже алгоритм построения дерева повторяется для каждой из этих величин). На основе каждого найденного соотношения  $calc(x)$  формируется *currPaths* – набор объектов *Path*, каждому из которых в свойство  $S^i$  помещаются  $calc(x).known\_variables$ , а в свойство *Indexes* – идентификационный номер  $x$ . Далее для формирования веток дерева И/ИЛИ повторяется описываемая ниже процедура.

**Шаг 1.** Перебираются обозначения из  $S^i$  каждого объекта *Path* из *currPaths*, для каждого такого обозначения ищутся

соотношения вычислимости  $calc(x)$ , у которых  $calc(x).goal\_variable$  совпадает с этим обозначением. Если такое соотношение находится, то

- формируется объект  $newPath$  с  $S^i := calc(x).known\_variables, Index := x$ ;
- формируется ветка дерева И/ИЛИ [ $Path.Index, x$ ].

**Шаг 2.**  $currPaths$  полагаем равными набору объектов  $newPaths$ , сформированных на предыдущем шаге алгоритма на основе всех объектов  $Path$  из  $currPaths$ . Если  $newPaths$  не пустое множество, переходим к Шагу 1.

В ходе выполнения вышеописанной процедуры может возникнуть такая ситуация, когда объект  $newPath$  не сформируется (т.е. не найдется соотношение вычислимости, отвечающее требуемому условию). В этом случае, если обозначения из  $S^i$  объекта  $Path$  являются координатами некоторого вектора (напомним, что для каждой учебной задачи автор курса указывает список векторов и формулы, связывающие обозначение вектора с обозначениями его координат), то далее алгоритмом генерируется сообщение о том, что необходимо построить дерево И/ИЛИ для этого вектора.

**Формирование поддерева И/ИЛИ** осуществляется следующим образом.

- 1) На вход подается соотношение вычислимости  $calc(x)$ .
- 2) Из множества веток извлекается множество идентификационных номеров соотношений вычислимости, включающее последние элементы веток, у которых первый элемент совпадает с номером рассматриваемого отношения вычислимости. Обозначим это множество  $Ids$ .
- 3) Для каждой  $j$ -й переменной  $var$  из  $calc(x).known\_variables$  выполняется следующая процедура:

- ищутся  $y_k$  из множества  $Ids$  такие, что  $calc(y_k).goal\_variable$  совпадает с  $var$ , на их основе формируются элементы  $z^k = [z_1, \dots, z_m]$ , где  $z_1, \dots, z_m$  берутся из  $calc(y_k).known\_variables$ ;
- на основе элементов  $z^k$  формируется элемент  $e_j = [[z^1], \dots, [z^r]]$ .



4) Формируется поддерево  $x: [[e_1], \dots, [e_n]]$ .

## 6. Вычислительная сложность предлагаемого алгоритма

На данном этапе полностью оценить вычислительную сложность предлагаемого алгоритма не представляется возможным, так как этот алгоритм задействует такие сторонние алгоритмы и методы, как аппарат регулярных выражений (задействуется в некоторых случаях во время операций поиска и замены строк), алгоритм упрощения выражений, алгоритм унификации выражений.

Поскольку предполагается, что деревья И/ИЛИ, посредством которых представляется информация об известных решениях учебных задач, будут генерироваться в режиме оффлайн, т.е. на этапе настройки системы, то наиболее критическим местом алгоритма является генерация решений и поиск по ним. Соответственно, вычислительную сложность алгоритма характеризует количество решений, которые могут быть сгенерированы для учебной задачи на основе деревьев И/ИЛИ.

Вообще деревья И/ИЛИ являются удобным инструментом перечисления разнообразных информационных объектов, имеющих достаточно сложную структуру. В [2] деревья И/ИЛИ применялись для генерации вопросов и тестовых заданий в компьютерном тестировании. В [2] предлагается алгоритм подсчета вариантов в дереве И/ИЛИ в виде следующей рекурсивной функции:

$$\omega(z) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \omega(s_i^z) & \text{для ИИЛ - узла,} \\ \prod_{i=1}^n \omega(s_i^z) & \text{для И - узла,} \\ 1 & \text{для листа} \end{cases}$$

где  $z$  – рассматриваемый узел дерева;  $\{s_i^z\}$  – множество сыновей узла  $z$ ;  $n$  – количество сыновей;  $\omega(z)$  – количество вариантов для узла  $z$ .

Пусть степень любого узла (т.е. количество сыновей узла) дерева И/ИЛИ не превышает  $m$ . Назовем глубиной дерева И/ИЛИ количество узлов, встречающихся по ходу наиболее длинного маршрута от корня дерева к листу (включая узел, соответствующий корню дерева). Рассмотрим деревья И/ИЛИ глубины 2.

Наиболее вычислительно сложным окажется дерево  $T_{max}^2$ , представляющее собой И-узел, сыновья которого – ИЛИ-узлы с сыновьями-листьями. У такого дерева

$$\omega(z) \leq m^m.$$

Рассмотрим деревья И/ИЛИ глубины 3. Наиболее вычислительно сложным окажется дерево, представляющее собой И-узел, каждый сын которого – дерево вида  $T_{max}^2$ . У такого дерева

$$\omega(z) \leq (m^m)^m, \text{ т.е. } \omega(z) \leq m^{m^2}.$$

Продолжая аналогичные рассуждения, получим, что для дерева И/ИЛИ глубины  $p$  и максимальной степени узла  $m$

$$\omega(z) \leq m^{m^{p-1}}.$$

В такой постановке предлагаемый алгоритм имеет высокую вычислительную сложность, поэтому необходимо его оптимизировать. Оптимизация может заключаться в том, чтобы генерировать выражения, которые сравниваются с формулой, введенной обучаемым и оценивать прогресс в решении на основе деревьев И/ИЛИ, а не на основе решений (т.е. исключить решения, генерируемые на основе деревьев И/ИЛИ как промежуточное звено).

## 7. Заключение

В данной статье на примере задачи из курса линейной алгебры рассмотрен ряд случаев, возникающих при проверке решений одного класса учебных задач. Предложен алгоритм выявления зависимостей между «базовыми» формулами, посредством которых представляются сведения об известных решениях учебной задачи, и формулой, введенной обучаемым. Отметим, что идея и реализация предлагаемого алгоритма измерения прогресса в решении похожа на некоторые

идеи и техники из теории систем переписывания термов [16]. Так, например, отношения вычислимости похожи на *редукции* – бинарные отношения, с помощью которых кодируются правила преобразования термов; в ходе переписывания термов так же, как и в предлагаемом алгоритме, осуществляется преобразование (переписывание) совокупности одних величин (термов) в другие. К сожалению, напрямую аналогии провести нельзя, поскольку отличаются цели и критерии остановки преобразования.

Предлагаемый алгоритм, в отличие от известного алгоритма, реализованного в подсистеме проверки решений Andes Physics Tutor, в некоторых случаях обнаруживает факты имитации правильно введенных шагов решения, а также способен обрабатывать формулы, содержащие векторы и матрицы. Предлагаемый алгоритм имеет свои ограничения (см. раздел 2) и обладает значительно большей вычислительной сложностью, чем известный алгоритм.

Дальнейшее развитие исследований предполагает:

- 1) оптимизацию предлагаемого алгоритма;
- 2) разработку дополнительных эвристик для обработки часто встречающихся на практике отклоняющихся от рекомендуемых правил ввода шагов решений, таких как

$$(1 - 3)^2 + (2 - 4)^2 = 8,$$

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2 \\ 3 - 4 \end{pmatrix},$$

и т.д.;

- 3) уточнение класса задач, к которым применим предложенный алгоритм (с помощью [6]).

Как показывает ряд приведенных выше примеров, автоматизированная проверка решений, введенных в достаточно свободной форме, возможна, но имеет свои ограничения. Чем меньше переменных и больше числовых значений в формуле, введенной обучаемым, тем большая неопределенность возникает при ее анализе. Предложенные эвристики помогают в ряде случаев, но не во всех, поэтому при проектировании следящей ИОС желательно предусматривать возможность для обучаемого

временно засчитать нераспознанный системой шаг решения и вывести его в специальном отчете для преподавателя.

### Литература

1. ВАСИЛЬЕВ С.Н. САБИТОВ Ш.Р., СМИРНОВА Н.В. и др. *Методическое обеспечение логических и оптимизационных задач в интеллектуальной обучающей системе «Волга» // Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды X Международной Четаевской конференции.* – Казань: изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – Т. 4. – С. 324.
2. КРУЧИНИН В.В. *Алгоритмы и перечислительные свойства деревьев И-ИЛИ* [Электронный ресурс]. – URL: <http://fdo.tusur.ru/articles/docs/25fc9f27315b76d32d7594de7811a1a7.pdf> (дата обращения: 14.03.2014).
3. ЛЕВИНСКАЯ М.А. *Продукционная модель интерактивной компоненты обучающей системы // Сб. науч. тр. «Математика. Компьютер. Образование».* – Ижевск, Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – Т. 1. – С. 81–92.
4. НЕЛЬСОН Н. *Искусственный интеллект.* – М.: Мир, 1973. – С. 91–128.
5. НОВИКОВ Ф.А. *Искусственный интеллект: представление знаний и методы поиска решений: Учеб. пособие.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 240 с.
6. ПОДКОЛЗИН А.С. *Компьютерное моделирование процессов решения математических задач. Т. 1–2.* – М.: Изд-во ЦПИ при мех.-мат. ф-те МГУ, 2001. – 235 с.
7. ФРИДМАН Л.М. *Логико-педагогический анализ школьных учебных задач.* – М.: Педагогика, 1977. – 208 с.
8. ŠERTIK O., MEURER A. *SymPy – a Python library for Symbolic Mathematics* [Электронный ресурс]. – URL: <http://sympy.org/ru/index.html> (дата обращения: 14.03.2014).
9. MELIS E., SIEKMANN J. *ActiveMath: an Intelligent Tutoring System for Mathematics // Artificial Intelligence and Soft Computing – ISAISC 2004.* – Springer, Berlin – Heidelberg, 2004. – Vol. 3070. – P. 91–101.

10. Moodle Mathematics [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.moodle.org/24/en/Mathematics> (дата обращения: 14.03.2014).
11. SANGWIN C.J. *Assessing Elementary Algebra with STACK* // International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. – 2008. – Vol. 38, №8. – P. 987–1002.
12. SANGWIN C.J. *Automating the marking of core calculus and algebra: eight years on*. [Электронный ресурс]. – URL: <http://web.mat.bham.ac.uk/C.J.Sangwin/Publications/2009-12-mmjg.pdf> (дата обращения: 14.03.2014).
13. SHAPIRO J.A. *An Algebra Subsystem for Diagnosing Students' Input in a Physics Tutoring System* // International Journal of Artificial Intelligence in Education. –2005. – №15. – P. 205–228.
14. SMIRNOVA N.V. *A checking students' input subsystem for model-tracing intelligent tutoring systems* – [Электронный ресурс]. – URL: [https://github.com/indra-uolles/solution\\_tracer](https://github.com/indra-uolles/solution_tracer) (дата обращения: 14.03.2014).
15. SMIRNOVA N.V. *Andes dependencies checking algorithm* [Электронный ресурс]. – URL: [https://github.com/indra-uolles/Andes\\_dependencies\\_algo](https://github.com/indra-uolles/Andes_dependencies_algo) (дата обращения: 14.03.2014).
16. TERESE *Term Rewriting Systems*. – Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science. – Cambridge University Press, 2003. – 908 p.
17. VANLEHN K., LYNCH C., SCHULZE K. AND OTHER. *The Andes Physics Tutoring System: Lessons Learned* // International Journal of Artificial Intelligence in Education. –2005. – Vol. 15, №3. – P. 147–204.

**TOWARDS DIAGNOSING STUDENTS' INPUT IN  
MATHEMATICAL TASKS OF PARTICULAR TYPE FOR  
USE IN MODEL-TRACING INTELLIGENT TUTORING  
SYSTEMS**

**Natalia Smirnova**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (smirnovanatalia2008@gmail.com).

*Abstract: The paper is dedicated to computer-aided assessment of multi-step problems provided by interactive model-tracing intelligent tutoring systems. An approach is suggested for determining which formulas could student's formula be derived from. In some cases, the suggested approach can discover whether student's step is an imitation. The suggested approach is a part of the algorithm which calculates student's solution progress.*

**Keywords:** model-tracing intelligent tutoring systems, tutoring systems, computer-aided assessment, and/or graph, symbolic calculations

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии М.В. Губко*

*Поступила в редакцию 27.08.2013.  
Опубликована 31.03.2014.*

УДК 007:159.955  
ББК 30.17

## **ЗАДАЧИ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА**

**Кушников В. А.<sup>1</sup>**

*(Институт проблем точной механики  
и управления РАН, Саратов)*

**Щербаков М. А.<sup>2</sup>**

*(Саратовский государственный технический университет  
им. Гагарина Ю.А., Саратов)*

*В статье рассмотрены задачи, модели, алгоритмы и комплексы программ, позволяющие осуществить рациональное управление производством листового стекла по векторному критерию, характеризующему ущерб от нарушений качества выпускаемой продукции и вероятность возникновения аварии, приводящей к полной остановке флот-процесса.*

Ключевые слова: производство листового стекла, качество выпускаемой продукции, векторный критерий, математические модели, алгоритмы, комплексы программ.

### **1. Введение**

Одной из важных задач, стоящих перед отечественными стекольными предприятиями, является сокращение потерь из-за выпуска некачественной продукции и уменьшение числа аварий при производстве стекла. Так, на крупном стекольном предприятии доля брака в выпускаемой продукции может превысить 60 тыс. м<sup>2</sup> листового стекла в год [4, 13]. В промышленно развитых странах решение этой проблемы во многом осуществляется

---

<sup>1</sup> Вадим Алексеевич Кушников, доктор технических наук, профессор (kushnikoff@yandex.ru).

<sup>2</sup> Максим Александрович Щербаков, аспирант (max-ya@mail.ru).

за счет внедрения новых, более эффективных технологий на базе современной вычислительной техники.

Как объект управления производство листового стекла принадлежит к классу сложных человеко-машинных систем, процесс функционирования которых характеризуется большим числом качественных и количественных параметров, наличием сложных причинно-следственных связей, инерционностью каналов управления, значительной ролью оперативно-диспетчерского персонала при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции и безаварийности производственного процесса (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема процесса формования листового стекла как объекта управления ( $\bar{u}(t)$  – управляющие воздействия; ОС – обратная связь;  $\bar{\xi}(t)$  – возмущения)

Общие принципы управления сложными человеко-машинными системами рассмотрены в трудах зарубежных и



отечественных ученых, таких как Э. Фейгенбаум, Н.П. Бусленко, Д.Л. Поспелов, О.И. Ларичев, В.А. Ириков, А.Ф. Резчиков, Р.И. Макаров и др. [2, 3, 6, 10]. На основе этих исследований были разработаны и хорошо зарекомендовали себя на практике различные системы автоматизации сложных производственных объектов, в том числе и оборудование для автоматизированного управления флоат-процессом, например, такое как системы ГРАСмикро, «Алиса», «Димиконт», Metronex и др. [4, 5, 7, 8, 12–14].

Вместе с тем, большинство проблемно-ориентированных систем управления производством листового стекла, используемых на отечественных и зарубежных предприятиях стекольной промышленности, не позволяют минимизировать ущерб от выпуска некачественной продукции, а также вероятность возникновения аварии, приводящей к полной остановке флоат-процесса.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость разработки и внедрения нового математического обеспечения проблемно-ориентированных систем управления производством листового стекла, что позволит преодолеть указанные трудности. Данные соображения определяют актуальность, экономическую целесообразность и практическую значимость темы этой статьи, посвященной разработке новых задач, моделей и алгоритмов управления флоат-процессом по векторному критерию, характеризующему ущерб от выпуска некачественной продукции и вероятность возникновения аварии, приводящей к полной остановки производства.

## **2. Постановка задачи**

Задача рационального управления производством листового стекла по сформулированному выше векторному критерию в общем виде имеет следующую формулировку.

Необходимо разработать алгоритм нахождения управляющих воздействий  $\vec{u}^*(t) \in \{\vec{U}\}$ , минимизирующих на заданном временном интервале  $[t_n, t_k]$  при любых допустимых значениях

вектора состояний среды  $\vec{x}(t) \in \{\vec{X}\}$  критерий эффективности  $\vec{K} = (K_1, K_2)$ :

$$K_1 = \int_{t_H}^{t_K} D(t, \vec{x}, \vec{x}', \vec{u}, \vec{u}') dt; \quad K_2 = \int_{t_H}^{t_K} P(t, \vec{x}, \vec{x}', \vec{u}, \vec{u}') dt$$

при ограничениях:

$$F_k(t, \vec{x}, \vec{u}) \geq 0, \quad k=1, \dots, n_1, \quad \forall K_1 \in D_P : K_1 = K_{\min}$$

и граничных условиях

$$F_k^{(t_H)}(\vec{x}, \vec{u}) = 0, \quad k = n_2 + 1, \dots, n_3,$$

$$F_k^{(t_k)}(\vec{x}, \vec{u}) = 0, \quad k = n_3 + 1, \dots, n_4,$$

обусловленных спецификой функционирования объекта управления.

Здесь  $K_1, K_2$  – скалярные целевые функции векторного критерия;  $D$  – ущерб от снижения качества выпускаемой продукции;  $P$  – вероятность возникновения аварии, приводящей к полной остановке флот-процесса;  $D_P$  – подмножество области изменения целевой функции  $K_1$ , в каждой точке которого она достигает минимального значения  $K_{\min}$ ;  $\vec{x}'(t), \vec{u}'(t)$  – первые производные векторов состояния среды и управляющих воздействий соответственно;  $\{\vec{U}\}, \{\vec{X}\}$  – множества допустимых значений векторов  $\vec{x}(t), \vec{u}(t)$  соответственно;  $t$  – время;  $(n_1, \dots, n_4)$  – известные коэффициенты.

### 3. Общий подход к решению задачи

Задача (1) относится к классу многокритериальных на условный экстремум. Ее решению должно предшествовать установление отношения порядка между составляющими критерия эффективности  $\vec{K} = (K_1, K_2)$ .

По сведениям ОАО «Саратовстройстекло» потери от нарушений качества выпускаемой продукции, как правило, меньше ущерба от аварий, приводящих к полной остановке флот-процесса [14]. Так, в среднем за год только простой линии тер-

мического формования, вызванные обрывом ленты стекла, приводят к потерям более 40 тыс. м<sup>2</sup> стекла [5, 14]. Ввиду того что разрабатываемое математическое обеспечение ориентировано на внедрение в первую очередь в структурных подразделениях данного акционерного общества, свертка критериев была выполнена с присвоением абсолютного приоритета задаче оптимизации скалярного критерия  $K_2$ .

При внедрении данной задачи на других предприятиях стекольной промышленности порядок свертки критерия эффективности  $\vec{K} = (K_1, K_2)$  должен определяться, исходя из анализа причин возникновения брака листового стекла на конкретном производстве.

Последующая оптимизация каждого скалярного критерия осуществлялась с использованием метода кусочно-линейной аппроксимации, часто применяемого при решении данного класса задач.

Решение задач оптимизации скалярных критериев  $K_1, K_2$  связано со значительными трудностями ввиду высокой размерности и сложности математической модели объекта управления, необходимости учета как количественных, так и качественных параметров, влияющих на величину критериев эффективности, и др. В связи с этим обстоятельством был разработан эвристический метод решения данных задач, основные этапы которого рассмотрены ниже.

#### **4. Математические модели и алгоритм решения задачи оптимизации критерия $K_2$**

При разработке математической модели данной задачи были сделаны допущения, вытекающие из анализа особенностей функционирования объекта управления: полная остановка флотат-процесса возможна только при одновременной остановке его этапов  $a_1, \dots, a_3$ , так как процесс резки, раскроя и пакетирования листового стекла не прерывается даже при возникновении тяжелой аварии (рис. 2); предусмотрено одновременное выполнение ремонта всего отказавшего оборудования; случайные процессы отказов и восстановлений обладают марковским свойством.

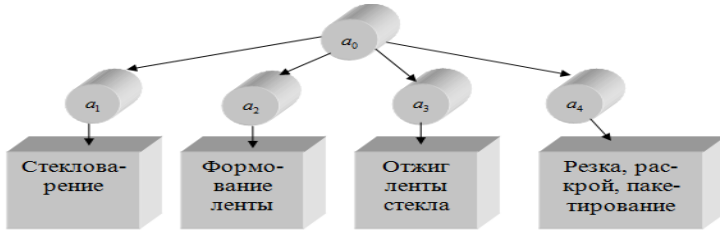


Рис. 2. Основные этапы процесса производства листового стекла ( $a_0$  – флот-процесс;  $a_1, \dots, a_4$  – основные этапы флот-процесса)

На основании сделанных допущений был сформирован граф основных состояний флот-процесса  $G(u, e)$ , см. рис. 3.

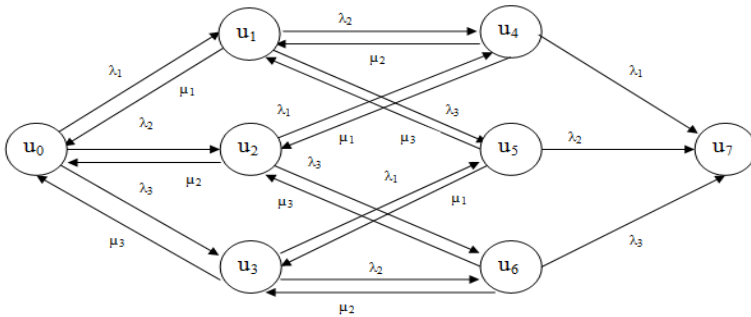


Рис. 3. Граф основных состояний флот-процесса  $G(u, e)$ , учитываемых при определении вероятности возникновения тяжелой аварии ( $u_0$  – полная работоспособность;  $u_1$  – прекращение процесса стекловарения;  $u_2$  – прекращение формования ленты;  $u_3$  – прекращение отжига ленты;  $u_4$  – прекращение этапов  $a_1, a_4$ ;  $u_5$  – прекращение этапов  $a_1, a_3$ ;  $u_6$  – прекращение этапов  $a_2, a_3$ ;  $u_7$  – полная остановка флот-процесса из-за возникновения аварии;  $\lambda_i, \mu_i, i = 1, 2, 3$  – интенсивности отказа и восстановления оборудования на  $i$ -м этапе процесса, соответственно)

С учетом вышеизложенного задача минимизации вероятности возникновения аварии, приводящей к полной остановке

флоат-процесса, заключается в выборе такой интенсивности восстановления отказов  $\mu^*_i(t) = i = 1, 2, 3$ , которая позволит на заданном временном интервале  $[t_n, t_k]$  минимизировать критерий

$$(1) \quad K_2 = \int_{t_n}^{t_k} P_7(P_0, P_1, P_2, P_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, t) dt \rightarrow \min$$

при следующих ограничениях:

$$(2) \quad \begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \mu_3 P_3(t); \\ \frac{dP_1}{dt} &= \lambda_1 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2)P_1(t) + \mu_2 P_4(t) + \mu_3 P_5(t); \\ \frac{dP_2}{dt} &= \lambda_2 P_0(t) - (\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_3)P_2(t) + \mu_1 P_4(t) + \mu_3 P_6(t); \\ \frac{dP_3}{dt} &= \lambda_3 P_0(t) - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2)P_3(t) + \mu_1 P_5(t) + \mu_2 P_6(t); \\ \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_3)P_4(t); \\ \frac{dP_5}{dt} &= \lambda_3 P_1(t) + \lambda_1 P_3(t) - (\mu_3 + \mu_1 + \lambda_2)P_5(t); \\ \frac{dP_6}{dt} &= \lambda_2 P_3(t) + \lambda_3 P_2(t) - (\mu_2 + \mu_3 + \lambda_1)P_6(t); \\ \frac{dP_7}{dt} &= \lambda_3 P_4(t) + \lambda_2 P_5(t) + \lambda_1 P_6(t), \end{aligned}$$

где  $P_i$ ,  $i = 0, \dots, 7$ , – вероятность перехода объекта управления в состояние  $u_i$ ,  $i = 0, \dots, 7$ .

Ограничения формирует система уравнений Колмогорова–Чепмена (3), принадлежащих к классу линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами; она построена по известным правилам на основе графа  $G(u, e)$ , см. рис. 3. Решение данной системы осуществлено аналитически, в результате была построена следующая зависимость:

$$\begin{aligned} P_7(t) &= \frac{1}{\mu_2 \mu_3 \mu_1} \left( \mu_2 \mu_3 \mu_1 e^{-(\mu_2 + \mu_1 + \mu_3 + \lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3)t} C8 - \right. \\ &\quad - \mu_1 \mu_2 \lambda_3 e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)t} C6 - \mu_3 \mu_1 \lambda_2 e^{-(\mu_3 + \mu_1 + \lambda_1 + \lambda_3)t} C7 - \\ &\quad - \mu_2 \mu_3 \lambda_1 e^{-(\mu_3 + \mu_2 + \lambda_2 + \lambda_3)t} C5 + \mu_1 \lambda_2 \lambda_3 e^{-(\mu_1 + \lambda_1)t} C3 + \\ &\quad \left. - \lambda_1 \mu_3 \lambda_2 e^{-(\mu_3 - \lambda_3)t} C2 + \lambda_1 \lambda_3 \mu_2 e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t} C4 - \lambda_1 \lambda_3 \lambda_2 C1 \right) \end{aligned}$$

Из анализа подынтегрального выражения критерия  $K_2$  следует, что его минимум достигается при коэффициентах  $\mu_i^*(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , обеспечивающих минимум подынтегральной функции  $P_7(t) = P_7(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \vec{a}, t)$ . Поиск минимума данной функции может быть осуществлен как с помощью методов исследования функций классического анализа, так и методами нелинейного программирования, например, методом сканирования.

### **5. Математические модели и алгоритм решения задачи оптимизации критерия $K_1$**

В формализованном виде задача минимизации скалярного критерия  $K_1$ , характеризующего ущерб от нарушений качества выпускаемой продукции, имеет следующую формулировку:

$$(4) \quad K_1 = \int_{t_n}^{t_k} D(t, \vec{x}, \vec{x}', \vec{u}, \vec{u}') dt \rightarrow \min ,$$

$$\exists D_p, \forall K_1 \in D_p : K_1 = K_{\min} .$$

Иными словами, при решении данной задачи необходимо определить такие значения вектора управляющих воздействий  $\vec{u}^*(t) \in \{\vec{U}\}$ , которые обеспечат попадание критерия  $K_1$  в область его минимальных значений  $D_p$ . Наличие такой области для данной задачи подтверждается анализом причинно-следственных связей флот-процесса и не противоречит мнению оперативно диспетчерского персонала, считающего, что оптимальное решение (4) должно быть не единственно.

Решение задачи (4) известными методами вариационного исчисления сталкивается со значительными трудностями: необходимостью разработки сложной динамической модели флот-процесса, учитывающей его количественные и качественные параметры; неопределенностью параметров модели на интервале  $[t_n, t_k]$  ввиду дрейфа возмущений и управляющих координат объекта; сложностью решения системы нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка при временных ограничениях и др.

В связи с этим обстоятельством в основу алгоритма решения положено неоднократно проверенное на практике утвер-

ждение, согласно которому для решения задачи минимизации ущерба  $D(t, \bar{x}, \bar{x}', \bar{u}, \bar{u}')$  достаточно разработать и реализовать подробный комплексный план мероприятий  $P$  по снижению брака при производстве листового стекла.

Для решения поставленной задачи был разработан план, граф которого имеет форму Лагранжева дерева и состоит из 768 вершин. Вершинами данного графа являются мероприятия плана, дуги определяют их взаимосвязь и последовательность осуществления. Фрагмент данного плана, связанный с решением проблемы уменьшения цеховой себестоимости листового стекла, приведен на рис. 4.

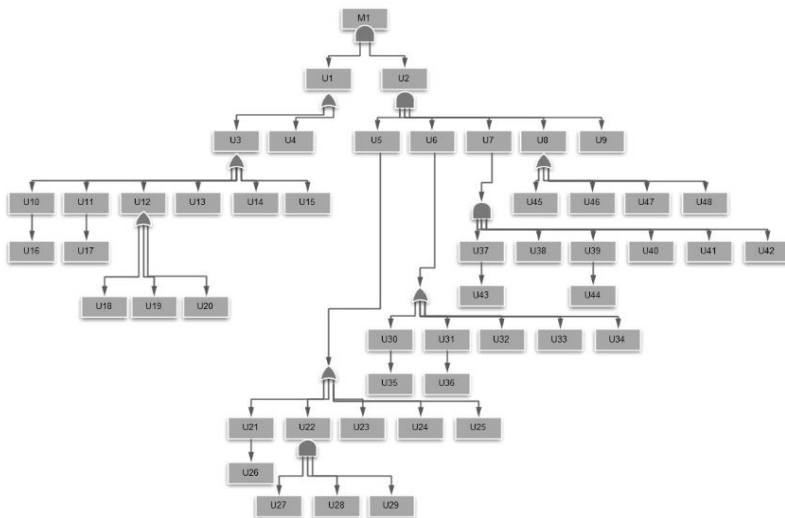


Рис. 4. Фрагмент плана мероприятий по уменьшению цеховой себестоимости стекла

Здесь  $M_1$  – уменьшение цеховой себестоимости стекла;  $U_1$  – снижение цеховой себестоимости стекломассы;  $U_2$  – сокращение цеховой себестоимости листового стекла;  $U_3$  – уменьшение эксплуатационных расходов стекловаренной печи;  $U_4$  – снижение цехового расхода сырья на участке варки-выработки;  $U_5$  – уменьшение эксплуатационных расходов фло-

ат-ванны;  $U_6$  – сокращение эксплуатационных расходов для печи отжига;  $U_7$  – уменьшение затрат на резание стекла;  $U_8$  – снижение затрат на складирование;  $U_9$  – сокращение расхода материала на участке резки-упаковки;  $U_{10}$  – уменьшение стоимости шихты;  $U_{11}$  – сокращение стоимости стеклобоя;  $U_{12}$  – снижение стоимости топлива на технологические цели;  $U_{13}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{40}$  – уменьшение основной и дополнительной заработной платы основных производственных рабочих;  $U_{14}$ ,  $U_{32}$  – оптимизация отчислений;  $U_{15}$  – снижение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования;  $U_{16}$  – сокращение расхода шихты;  $U_{18}$  – уменьшение расхода газа;  $U_{19}$ ,  $U_{36}$  – снижение расхода воздуха;  $U_{20}$  – оптимизация параметров регенеративного режима, тепловой и газовой стекловаренной печи;  $U_{21}$  – снижение затрат электроэнергии на технологические цели;  $U_{22}$  – сокращение стоимости вспомогательных материалов;  $U_{24}$  – уменьшение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования;  $U_{25}$  – оптимизация параметров газового режима формирования ленты стекла в ванне с расплавом олова;  $U_{26}$ ,  $U_{43}$  – уменьшение расхода электроэнергии;  $U_{27}$  – сокращение расхода олова;  $U_{28}$  – снижение расхода защитной атмосферы;  $U_{29}$  – оптимизация расхода сернистого ангидрида;  $U_{30}$ ,  $U_{37}$  – уменьшение стоимости электроэнергии на технологические цели;  $U_{31}$ ,  $U_{39}$  – сокращение стоимости вспомогательных материалов;  $U_{33}$  – снижение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования;  $U_{34}$  – оптимизация расходов на отжиг ленты стекла;  $U_{35}$  – уменьшение нормативного расхода электроэнергии;  $U_{41}$  – снижение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования;  $U_{42}$  – снижение затрат на раскрой ленты на форматы;  $U_{44}$  – уменьшение расхода вспомогательных материалов;  $U_{45}$  – сократить стоимость возвратных отходов сократить;  $U_{46}$  – уменьшить количество складироваемых материалов;  $U_{47}$  – урезать основную и дополнительную зарплату работников склада;  $U_{48}$  – снизить затраты на управление складом готовой продукции;  $\text{■}$  – символ конъюнкции,  $\text{▲}$  – символ дизъюнкции).

На выполнимость каждого мероприятия плана в общем случае могут повлиять  $i = 1, \dots, m$  условий, которые в общем виде записываются в виде следующих выражений:



(5) Условие  $f_i$ : ЕСЛИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ

$\rightarrow \rightarrow \quad \rightarrow \rightarrow \quad \rightarrow \rightarrow$   
 $\langle B_1(x, u) R_1 B_2(x, u) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, u) \rangle$ , ТО  
 <МЕРОПРИЯТИЕ  $U_i \in \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  БУДЕТ  
 ВЫПОЛНЕНО/ НЕ ВЫПОЛНЕНО >

$R_i \in \{ \text{AND, OR, NOT, AND - NOT, OR - NOT} \}, i = \overline{1, k-1}$ .

Здесь  $B_i(x, u), i = 1, \dots, g$ , – условия выполнения соответствующих мероприятий,  $\{ \text{AND, OR, NOT, AND-NOT, OR-NOT} \}$  – множество логических операций И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, соответственно;  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  – множество мероприятий плана.

Сделанные допущения позволяют свести процедуру решения задачи (4) в составе информационных систем предприятий стекольной промышленности к периодической проверке выполнимости плана мероприятий  $P$  при известных значениях условий  $f_i, i = 1, \dots, M$ , ( $m, M$  – константы). Если план в момент времени  $t$  выполним, то, следовательно, в данный момент времени удалось минимизировать ущерб от нарушений качества выпускаемой продукции, т.е. решить поставленную задачу. В противном случае необходимо установить причины, препятствующие выполнению данного плана и устранить их.

## 6. Модельный пример решения задачи

Задача минимизации критерия  $K_2$ . Для упрощения расчета значений данного критерия преобразуем решение системы дифференциальных уравнений (3) к следующему виду:

$$\begin{aligned}
 P_7(t) = & -e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)} C8 + \frac{\lambda_3}{\mu_3} e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)} C6 + \\
 & + \frac{\lambda_2}{\mu_2} e^{-(\mu_1 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_3)} C7 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} e^{-(\mu_3 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_2)} C5 - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\mu_2 \mu_3} e^{-(\mu_1 + \lambda_1)} C3 - \\
 & - \frac{\lambda_2 \lambda_3}{\mu_2 \mu_3} e^{-(\mu_3 + \lambda_3)} C2 - \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\mu_1 \mu_3} e^{-(\mu_2 + \lambda_2)} C4 + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{\mu_1 \mu_2 \mu_3} C1.
 \end{aligned}$$

Определим значения числовых коэффициентов и переменных  $\lambda_i, \mu_i, i = 1, 2, 3$ , используемых при расчете величины  $P_7$  и минимизации критерия  $K_2$ . Исходя из опыта эксплуатации технологического оборудования, используемого при производстве листового стекла на ОАО «Саратовстройстекло», остановка процессов стекловарения, формования и отжига ленты происходит в основном из-за нарушения качества выпускаемой продукции и отказов технологического оборудования. Рассмотренные в данном примере причины остановки технологического процесса с указанием средней частоты их возникновения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Причины остановки технологического процесса (прекращение процессов стекловарения, формования и отжига ленты)

Причина остановки технологического процесса	Следствие	Частота возникновения, час <sup>-1</sup>
В выработочном канале, подлотковых брусках, шибере и сливном лотке постоянно образуются сколы и трещины, откалываются мелкие частицы огнеупоров	Возникновение дефектов стекла	$\lambda_1 = 0,03$
Температура олова, с правого и левого борта по зонам (в пяти точках) ванны расплава фиксируется ошибочно	Образование дефектов стекла из-за нарушения температурного режима	$\lambda_2 = 0,01$
Нарушение температурного режима при отжиге стекла	Брак из-за трещин на поверхности стекла	$\lambda_3 = 0,007$

Из опыта диспетчерского персонала известно, что каждую из этих причин можно устранить тремя способами (таблица 2).

Таблица 2. Способы устранения причин, вызвавших остановку технологического процесса

Интенсивность устранения неисправности, $\mu_1, \text{час}^{-1}$	Мероприятия по устранению	Интенсивность восстановления неисправности, $\mu_2, \text{час}^{-1}$	Мероприятия по устранению	Интенсивность восстановления неисправности, $\mu_3, \text{час}^{-1}$	Мероприятия по устранению
Первый способ					
3,33	Проверка огнеупоров, лотка и шибера	1,25	Настройка датчиков температуры	1,11	Настройка регулятора температуры
Второй способ					
0,09	Ремонт огнеупоров, лотка и шибера	0,62	Ремонт датчиков температуры	0,45	Ремонт регулятора температуры
Третий способ					
0,07	Замена огнеупоров, лотка и шибера	0,39	Замена датчиков температуры	0,45	Замена регулятора температуры

Определим решение задачи  $\mu_i^*(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , воспользовавшись значениями  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , приведенными в таблицах 1 и 2. Полученные результаты представим в виде таблицы 3.

Таблица 3. Результаты решения задачи минимизации критерия  $K_2$

$P_7^1 \text{ способ} = 0,00187$		
$\mu_1^*$	$\mu_2^*$	$\mu_3^*$
3,33	1,25	1,11
$P_7^2 \text{ способ} = 0,1238$		
$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
0,09	0,62	0,45
$P_7^3 \text{ способ} = 0,13062$		
$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
0,07	0,39	0,45

Таким образом, минимальное значение вероятности полной остановки процессов стекловарения, формования и отжига ленты достигается при выборе первого способа устранения причин ситуации, рассмотренной в таблице 1.

Для этого ЛПР необходимо выполнить следующие действия:

1. Проверить огнеупоры, лотки и шибер.
2. Настроить датчики температуры.
3. Настроить регулятор температуры.

Оптимизации критерия  $K_1$ . Представим фрагмент плана мероприятий по уменьшению цеховой себестоимости листового стекла см. рис. 4 в виде следующей системы продукций:

ПЛАН  $M_1$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕН, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_1$  И  $U_2$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_1$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_3$  ИЛИ  $U_4$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_3$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{10}$  И  $U_{11}$  И  $U_{12}$  И  $U_{13}$  И  $U_{14}$  И  $U_{15}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{10}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{16}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{11}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{17}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{12}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{18}$  ИЛИ  $U_{19}$  ИЛИ  $U_{20}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_2$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_5$  И  $U_6$  И  $U_7$  И  $U_8$  И  $U_9$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_5$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{21}$  ИЛИ  $U_{22}$  ИЛИ  $U_{23}$  ИЛИ  $U_{24}$  ИЛИ  $U_{25}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{21}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{26}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{22}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{27}$  И  $U_{28}$  И  $U_{29}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_6$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{30}$  ИЛИ  $U_{31}$  ИЛИ  $U_{32}$  ИЛИ  $U_{33}$  ИЛИ  $U_{34}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{30}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{35}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{31}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{36}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_7$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{37}$  И  $U_{38}$  И  $U_{39}$  И  $U_{40}$  И  $U_{41}$  И  $U_{42}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{37}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{43}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{39}$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО МЕРОПРИЯТИЕ  $U_{44}$ ;

МЕРОПРИЯТИЕ  $U_8$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ  $U_{45}$  ИЛИ  $U_{46}$  ИЛИ  $U_{47}$  ИЛИ  $U_{48}$ .

В качестве условий (5), влияющих на выполнение мероприятий плана, были использованы приведенные ниже правила, сформированные оперативно-диспетчерским персоналом ОАО «Саратовстройстекло» и формализованные в виде продукции в [4]:

Условие  $f_1$ : ЕСЛИ на поверхности стекломассы периодически появляются вторичные пузыри, ТО они приводят к дефектам стекла типа вторичная «мошка» ИЛИ к новым вторичным

пузырям, И выполнение мероприятия  $U_2$  (сокращение цеховой себестоимости листового стекла) невозможно.

Условие  $f_2$ : ЕСЛИ произошло временное повышение концентрации кислорода ИЛИ влаги в подаваемой защитной атмосфере, ТО ухудшение качества стекла И выполнение мероприятий  $U_4$  (снижение цехового расхода сырья на участке варки-выработки),  $U_5$  (уменьшение эксплуатационных расходов флот-ванны),  $U_6$  (сокращение эксплуатационных расходов для печи отжига),  $U_{12}$  (снижение стоимости топлива на технологические цели),  $U_{21}$  (снижение затрат электроэнергии на технологические цели) возможно.

Условие  $f_3$ : ЕСЛИ выполнено условие  $f_2$  И технологический процесс ведется с низким значением «восстановительного потенциала», ТО временное повышение концентрации кислорода ИЛИ влаги в подаваемой защитной атмосфере не приведет к ухудшению качества стекла И выполнение мероприятий  $U_4$  (снижение цехового расхода сырья на участке варки-выработки),  $U_5$  (уменьшение эксплуатационных расходов флот-ванны),  $U_6$  (сокращение эксплуатационных расходов для печи отжига),  $U_{12}$  (снижение стоимости топлива на технологические цели),  $U_{21}$  (снижение затрат электроэнергии на технологические цели) возможно.

Условие  $f_4$ : ЕСЛИ количество олова, внедренного в нижнюю поверхность стекла соответствует толщине стекла, скорости выработки и др. факторов, ТО общие усредненные физико-химические условия процесса формирования соответствуют регламентным И выполнение мероприятий  $U_{27}$  (сокращение расхода олова),  $U_{28}$  (снижение расхода защитной атмосферы),  $U_{29}$  (оптимизация расхода сернистого ангидрида) невозможно.

Условие  $f_5$ : ЕСЛИ температура стекломассы в головной части ванны расплава не соответствует регламентным значениям, ТО температура подаваемой стекломассы из выработочного канала стекловаренной печи не соответствует регламентным значениям ( $T = 1100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) И выполнение мероприятий  $U_{24}$  (уменьшение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования),  $U_{25}$  (оптимизация параметров газового режима формирования ленты стекла в ванне с расплавом олова),  $U_{26}$  и  $U_{43}$  (уменьшение расхода электроэнергии) невозможно.

Условие  $f_6$ : ЕСЛИ температура в выработочном канале регистрируется правильно И выработка управляющих команд осуществляется ошибочно, ТО выдача управляющих команд с запозданием приводит к ухудшению физико-химических условий и дефектам стекла и выполнение плана М1 (уменьшение цеховой себестоимости листового стекла) невозможно.

Условие  $f_7$ : ЕСЛИ не реже 1 раза в смену происходит несанкционированная остановка первого растягивающего устройства, ТО возникнет наличие старой стекломассы в районе первого растягивающего устройства И ухудшение физико-химических условий И возникнут дефекты стекла и выполнение плана М1 (уменьшение цеховой себестоимости стекла) невозможно.

Условие  $f_8$ : ЕСЛИ не реже 1 раза в смену происходит несанкционированная остановка второго растягивающего устройства, ТО возникнет наличие старой стекломассы в районе второго растягивающего устройства И ухудшение физико-химических условий И возникнут дефекты стекла и выполнение плана  $U_2$  (уменьшение цеховой себестоимости листового стекла) невозможно.

По известным правилам, используемым при проектировании цифровых ЭВМ [1, 11], системе продукции ставится в соответствие логическая функция,  $F(U_1, U_2, \dots, U_{45}, f_1, f_2, \dots, f_8)$ , где  $U_1, U_2, \dots, U_{45}$  – мероприятия плана, изображенного на рис. 4, а  $f_1, f_2, \dots, f_8$  – условия (5) их выполнения.

Логическая функция, используемая для проверки выполнимости плана мероприятий по уменьшению цеховой себестоимости листового стекла (рис. 4), для данного модельного примера имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 F(U_1, U_2, \dots, U_{45}, f_1, f_2, \dots, f_8) = & f_1 f_2 f_3 f_6 f_7 f_8 U_1 U_5 ((f_4 U_{27} + \\
 & + f_4 U_{28} + f_4 U_{29}) U_{22} + f_3 f_2 f_5 U_{21} U_{26} + U_{23} + f_5 U_{24} + \\
 (6) & + f_5 U_{25}) U_8 U_9 (f_5 U_{37} U_{43} U_{38} U_{39} U_{40} U_{41} U_{42} U_{44}) * \\
 & * (f_2 f_3 U_4 + U_3 (U_{16} U_{10} + U_{11} U_{17} + f_2 f_3 U_{12} (U_{18} + U_{19} + \\
 & + U_{20}) + U_{13} + U_{14} + U_{15})).
 \end{aligned}$$

Она принимает значения:

$$F(U_1, U_2, \dots, U_{45}, f_1, f_2, \dots, f_8) = \begin{cases} 1, & \text{если план выполним,} \\ 0, & \text{если план невыполним.} \end{cases}$$

Задавая различные комбинации значений аргументов этой функции и определяя соответствующие этим аргументам значения  $F(U_1, U_2, \dots, U_{45}, f_1, f_2, \dots, f_8)$ , можно анализировать степень выполнения плана намеченных мероприятий в различных производственных ситуациях; определить не выполненные мероприятия, сдерживающие успешное осуществление разработанного плана, и получить новые сведения об условиях выполнения плана.

В частности, при невыполнении условия  $f_1$  оптимизировать критерий  $K_1$  невозможно, так как на поверхности стекломассы периодически появляются вторичные пузыри, что приводит к дефектам стекла типа вторичная «мошка» и не позволяет сократить до заданного уровня цеховую себестоимость листового стекла (мероприятие  $U_2$ ) и, как следствие, выполнить весь план мероприятий по уменьшению цеховой себестоимости стекла.

На рис. 5 приведена схема дискретного устройства  $D_{МА}$ , построенного по булевой функции (6) и применяемого для быстрой проверки выполнения плана, представленного на рис. 4.

Из рассмотренного выше модельного примера следует, что оперативная проверка выполнимости даже сравнительно небольшого фрагмента плана мероприятий см. рис. 4 без использования разработанной теории, безусловно, вызовет затруднения у ЛПР и потребует существенных временных затрат.



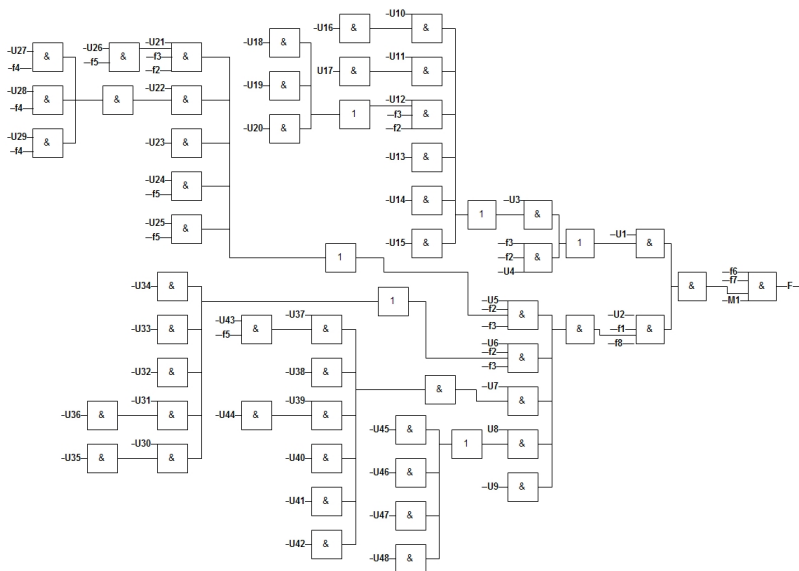


Рис. 5. Схема дискретного устройства  $D_{MA}$ , применяемого для проверки выполнения фрагмента плана мероприятий по уменьшению цеховой себестоимости стекла

## 7. Программное и техническое обеспечение

Для практической реализации разработанного математического обеспечения был разработан пакет программ «Информационная система для поддержки принятия решений при управлении процессом производства стекла», прошедший государственную регистрацию [9]. На рис. 6 приведена структура комплекса технических средств проблемно-ориентированной системы управления производством листового стекла предприятия ОАО «Саратовстройстекло», в составе которой предполагается осуществить внедрение разработанного математического и информационно-программного обеспечения.

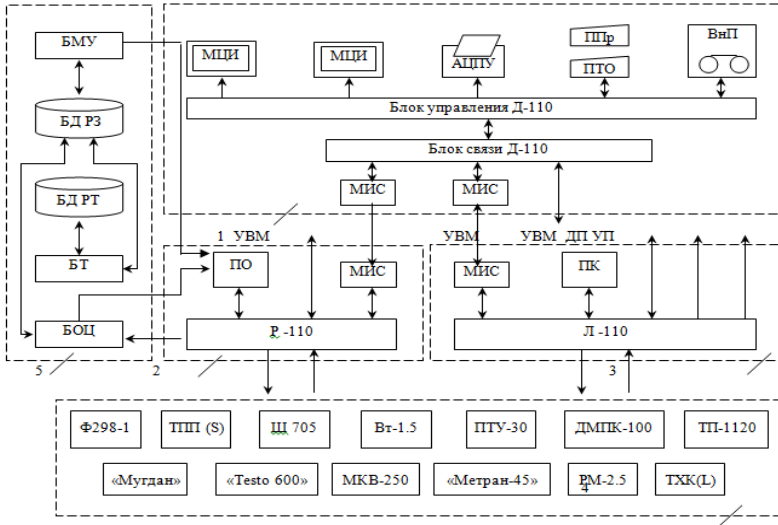


Рис. 6. Проблемно-ориентированная система управления производством листового стекла, реализованная на микропроцессорных контроллерах

Здесь 1 – «Димиконт Д-110»; 2 – «Ремиконт Р-110»; 3 – «Ломиконт Л-110»; 4 – измерительные приборы; 5 – блок интеллектуального управления; ПО – пульт оператора; ПК – пульт контроллера; МИС – модуль интерфейсной связи; МЦИ – модуль цветовой индикации; АЦПУ – алфавитно-цифровое печатающее устройство; ППр – пульт программирования; ПТО – пульт технолога-оператора; ВнП – внешняя память; УВМ – управляющие вычислительные машины; ДП – дисплей; УП – печатающее устройство; БМУ – блок минимизации ущерба от выпуска некачественной продукции; БОЦ – блок оценки вероятности возникновения аварии, приводящей к полной остановке флоат-процесса; БТ – блок тренажера; БД РТ – база данных результатов тестирования; БД РЗ – база данных решаемых задач

Данный комплекс технических средств позволяет осуществить оперативное управление процессом производства листового стекла по векторному критерию, характеризующему ущерб

от нарушений качества выпускаемой продукции и вероятность возникновения аварии, приводящей к полной остановке флоат-процесса.

Процедура решения данной задачи представлена в виде информационно-логической схемы на рис. 7.

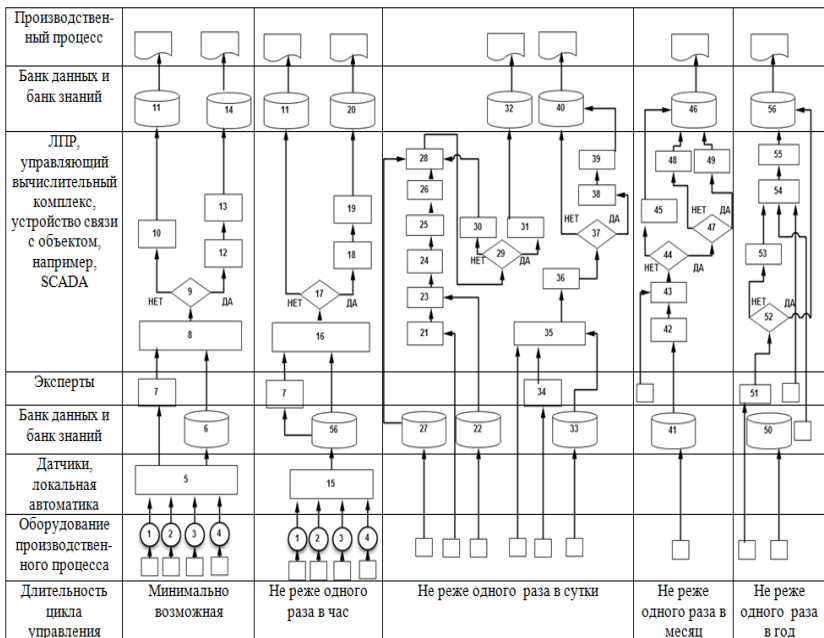


Рис. 7. Информационно – логическая схема решения задачи управления производством листового стекла

На рис. 7 сделаны следующие обозначения: 1 – процесс стекловарения; 2 – процесс формования ленты; 3 – процесс отжига ленты; 4 – процессы резки, раскройки, пакетирования стекла; 5 – сбор информации о производственных процессах, поступающей от датчиков и устройств локальной автоматки; 6 – запись информации в базу данных и базу знаний; 7 – экспертная оценка ситуации при значительном отклонении параметров производственного процесса от заданных значений ; 8 – идентификация текущей ситуации, возникшей при производстве листового стекла; 9 – ситуация аварийная?; 10 – сооб-

щение о возникновении штатной производственной ситуации, требующей вмешательства диспетчера; 11 – занесение информации о штатной производственной ситуации в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 12 – сообщение о возникновении аварийной производственной ситуации; 13– принятие решения по устранению аварийной ситуации; 14 – занесение информации об аварийной производственной ситуации и принятых мерах по ее ликвидации в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 15 – сбор информации об отказах производственного оборудования; 16 – анализ состояния производственного оборудования; 17 – произошел отказ производственного оборудования, учитываемого в математической модели? 18 – сообщение ЛПП об отказе оборудования; 19 – коррекция коэффициентов  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; 20 – занесение в базу данных измененных коэффициентов  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; 21 – постановка на решение задачи минимизации вероятности возникновения аварии, приводящей к полной остановке флот-процесса; 22 – вызов из базы данных текущих значений коэффициентов  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; 23 – идентификация параметров математической модели задачи минимизации критерия  $K_2$ ; 24 – решение системы дифференциальных уравнений (3); 25 – минимизация целевой функции (2); 26 – определение оптимальных значений коэффициентов восстановления отказавшего оборудования  $\mu_i^*(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; 27 – вызов из базы данных сведений о мероприятиях по ремонту оборудования; 28 – формирование перечня мероприятий, позволяющих осуществить ремонт отказавшего оборудования с интенсивностью  $\mu_i^*(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; 29 – перечень ремонтных мероприятий одобрен ЛПП?; 30 – внесение изменений в разработанный список мероприятий; 31 – выдача рекомендаций по реализации перечня мероприятий; 32 – занесение информации о реализованных мероприятиях в базу данных; 33 – поиск информации в базе данных о происшедших нарушениях качества выпускаемой продукции; 34 – сбор экспертной информации о нарушениях качества выпускаемой продукции; 35 – формирование плана мероприятий, используемого при минимизации ущерба от нарушений качества выпускаемой продукции, например, средствами корпоративной системы управления про-

ектами TimeBridge или при помощи программного продукта [9]; 36 – формирование логической функции  $F(u_1, u_2, \dots, u_{48}, f_1, f_2, \dots, f_{89})$ , используемой при проверке выполнимости плана мероприятий; 37 – проверка условия  $F(u_1, u_2, \dots, u_{48}, f_1, f_2, \dots, f_{89}) = 1$ , т.е. план выполнен?; 38 – поиск по графу (рис. 4) причин неисполнения плана мероприятий; 39 – выдача рекомендаций по устранению причин невыполнения плана; 40 – занесение информации о результатах решения задачи минимизации ущерба от нарушений качества выпускаемой продукции в базу данных; 41 – сбор информации о рекомендациях, выданных и реализованных в процессе решения задачи за месяц; 42 – составление списка нереализованных рекомендаций; 43 – анализ списка нереализованных рекомендаций; 44 – работа программного комплекса эффективна?; 45 – коррекция параметров математической модели  $\lambda_i, \mu_i, i = 1, 2, 3$  и/или плана мероприятий, используемого при минимизации ущерба от нарушений качества выпускаемой продукции; 46 – занесение изменений в базу данных; 47 – работа диспетчерского персонала эффективна?; 48 – премирование; 49 – анализ причин неэффективного использования разработанного математического обеспечения; 50 – накопление информации об управляющих воздействиях, реализованных в течение года; 51 – экспертная оценка величины экономического эффекта от реализации управляющих воздействий; 52 – уровень ожидаемого экономического эффекта от решения задачи достигнут или превышен? 53 – анализ причин; 54 – коррекция плана мероприятий, направленных на минимизацию ущерба от нарушений качества выпускаемой продукции; 55 – утверждение скорректированного плана ЛПП; 56 – занесение информации в базу данных.

Из рис. 7 следует, что задача управления производством листового стекла решается на временных интервалах различной длины: минимально возможном, 1 час, 1 сутки, 1 месяц и 1 год.

На первом из этих интервалов осуществляется сбор информации о процессе производства листового стекла и идентификация текущей производственной ситуации. При возникновении аварийной ситуации или ситуации, требующей немедленного вмешательства управленческого персонала, соответствующая

информация доводится до сведения ЛПР и заносится в журнал сменного диспетчера на электронном носителе.

На временном интервале не реже одного раза в 1 час выполняются анализ состояния производственного оборудования и сбор информации об его отказах, определяются и заносятся в базу данных АСУ ТП значения коэффициентов  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

На временном интервале не реже одного раза в 1 сутки решается задача управления флоат-процессом по векторному критерию, характеризующему ущерб от выпуска некачественной продукции и вероятность возникновения аварии, приводящей к полной остановке производства. Выданные ЛПР рекомендации, а также реализованные управляющие воздействия заносятся в базу данных АСУ производством листового стекла.

На временном интервале не реже одного раза в 1 месяц проводится анализ информации о рекомендациях, выданных и реализованных в процессе решения задачи за месяц, составляется список нереализованных рекомендаций и на его основе оценивается эффективность функционирования программного комплекса. При необходимости выполняется коррекция параметров математической модели  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , и плана мероприятий, используемого при минимизации ущерба от нарушений качества выпускаемой продукции. В зависимости от достигнутых результатов осуществляется премирование диспетчерского персонала или анализируются причины неэффективного использования разработанного математического обеспечения.

На временном интервале не реже одного раза в 1 год на основе анализа накопленной информации об управляющих воздействиях, реализованных в течение года, осуществляется экспертная оценка величины экономического эффекта от решения задачи. При не достижении ожидаемого уровня экономического эффекта выполняется коррекция плана мероприятий, направленных на минимизацию ущерба от нарушений качества выпускаемой продукции, а также параметров используемой математической модели.

## 8. Заключение

В настоящее время разработанное математическое обеспечение проходит внедрение в структурных подразделениях ОАО «Саратовстекло». Его эксплуатация в тестовом режиме в качестве информационно-советующей системы повысило оперативность и качество управленческих решений, принимаемых оперативно-диспетчерским персоналом предприятия к действиям в сложных производственных ситуациях, периодически возникающих при производстве листового стекла.

### Литература

1. БОЙКО В.И., ГУРЖИЙ А.Н., ЖУЙКОВ А.А., ЗОРИ А.А. и др. *Схемотехника электронных систем. Цифровые устройства*. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 512 с.
2. ВАСИЛЬЕВ С.Н. *От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. I* // Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 2001.– №1. – С. 5–22.
3. ВАСИЛЬЕВ С.Н. *От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. II* // Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 2001.– №2. – С. 5–21.
4. ДОМНИЧ В.С., ИВАЩЕНКО В.А., ПЕТРОВ Д.Ю. *Автоматизация поиска причин аварийных ситуаций при формировании листового стекла* // Проблемы управления. – 2011. – № 5. – С. 52–58.
5. КУШНИКОВ В.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ФОМИНЫХ Д.С., САНЬКОВА А.Б. *Модели и алгоритмы системы оперативного управления процессом формирования листового стекла* // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – №12. – С. 16–24.
6. КУШНИКОВ В.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ЦВИРКУН А.Д. *Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей* // Автоматика и телемеханика. – 1998. – №7. – С. 168–175.
7. МАКАРОВ Р.И., ХОРОШЕВА Е.Р., ЛУКАШИН С.А. *Автоматизация производства листового стекла* – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 192 с.

8. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ШРАЙ Ю.К., КУШНИКОВ В.А., ДОНИН С.Г. *Оперативная идентификация и управление режимами эксплуатации энергосистем предприятия* // Приборы и системы управления. – 1994. – №5. – С. 12–15.
9. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Информационная система для поддержки принятия решений при управлении процессом производства стекла* / ЩЕРБАКОВ М.А., КУШНИКОВ В.А. № гос. рег. 2011619165, дата регистрации 25.11.2011.
10. ЦВИРКУН А.Д. *Основы синтеза структуры сложных систем*. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
11. ШАПОРЕВ С.Д. *Математическая логика. Курс лекций и практических занятий*. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 416 с.
12. ШЛЫЧКОВ Е.И., КУШНИКОВ В.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф., БОЙКОВА О.М. *Противоаварийный тренажер для подготовки операторов формования листового стекла* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – №4(18), Выпуск 3. – С. 125–131.
13. ШЛЫЧКОВ Е.И., ФОМИНЫХ Д.С., КУШНИКОВ В.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф. *Автоматизированная система ситуационного управления процессом формования листового стекла* // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – №8. – С. 3–11.
14. ЩЕРБАКОВ М.А., КУШНИКОВ В.А. *Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла* // Вестник СГТУ. – 2011. – №2(55). Выпуск 1. – С. 196–199.



## PROCESS CONTROL SYSTEM FOR FLOAT GLASS PRODUCTION: PROBLEMS, MODELS, AND ALGORITHMS

**Vadim Kushnikov**, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, professor (kushnikoff@yandex.ru)  
**Maxim Shcherbakov**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, graduate student (max-yta@mail.ru)

*Abstract: We discuss problems, models, algorithms, and software to design rational control for flat glass production process. The rational control must optimize a vector criterion which characterizes damage caused by product quality corruption and the probability of an accident leading to the complete shutdown of the float process.*

Keywords: float process, production quality, vector criterion, mathematical models, algorithms, software.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Н.Н. Бахтадзе*

*Поступила в редакцию 16.10.2013.  
Опубликована 31.03.2014.*

**www.mtas.ru**

**ИНТЕРНЕТ-сайт теории управления  
организационными системами**

**ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ**

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН



**Целью сайта** является предоставление специалистам по теории и практике управления организационными системами (ученым, преподавателям, аспирантам, студентам, а также реальным управленцам) доступа к ресурсам, отражающим современное состояние теории и возможности обмена идеями и результатами.

**На сайте имеются разделы:**

**Теория** – с обзором теории управления организационными системами, глоссарием, информацией для аспирантов;

**Практика** – с обзором результатов внедрения механизмов управления в реальных организациях;

**Библиография** – около 2500 публикаций по теории управления, снабжена классификатором и аннотациями;

**Электронная библиотека** – около 700 полнотекстовых монографий, статей и учебных пособий;

**а также многое другое.**

На сайте работает **форум**, на котором можно обсудить вопросы, относящиеся к математике, экономике, управлению организациями, узнать новости теории управления и ознакомиться с планируемыми конференциями и семинарами.

# ubs.mtas.ru

Интернет-сайт электронного периодического  
научного издания «Управление большими  
системами: сборник трудов»

## УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН

С 1998 года Институт проблем управления РАН выпускает периодический сборник трудов ученых, занимающихся разработкой и исследованием математических моделей управления большими (социально-экономическими, организационными, организационно-техническими и др.) системами. Все статьи, публикуемые в сборнике, проходят рецензирование ведущими специалистами по теории управления.

С 2006 года сборник "Управление большими системами" вместе с ведущим журналом ИПУ РАН "Проблемы управления" – включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

С июля 2007 года Сборник входит в список ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук):

- \* по управлению, вычислительной технике и информатике (для докторов наук);

- \* по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи; по энергетике (для кандидатов наук).

**Уважаемые коллеги! Приглашаем Вас опубликовать  
Вашу статью в очередном выпуске сборника  
"Управление большими системами"!**

Периодичность сборника - 4 раза в год. Время выхода прошедшей рецензирование статьи - 3-4 месяца. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.