



Южный  
федеральный  
университет

# И З В Е С Т И Я

- *Эволюционное моделирование*
- *Управление знаниями*
- *Моделирование и проектирование*
- *Вычислительная техника и электроника*

Тематический выпуск  
Интеллектуальные САПР

ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

# ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 6 (179). 2016 г.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ САПР

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

### Редакционный совет

Каляев И.А. (председатель); Курейчик В.М. (зам. председателя); Бородянский Ю.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Вагин В.Н.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Курейчик В.В.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чердниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

**Учредитель** Южный федеральный университет.

**Издатель** Южный федеральный университет.

**Ответственный за выпуск** Курейчик В.В.

**Главный редактор** Ярошевич Н.В.

**Оригинал-макет выполнен** Ярошевич Н.В.

Подписано к печати 27.06.2016 г. Формат  $70 \times 108 \frac{1}{8}$ . Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 21,3. Уч.-изд. л. – 21,0.

Заказ № . Тираж 250 экз.

**Адрес издателя:** 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

**Адрес типографии:** Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией кампуса в г. Таганроге отдела полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, Энгельса, 1. Тел. 8(8634)371717.

**Адрес редколлегии:** 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, ЮФУ, Д-225, телефон/факс: +7(8634)371071. E-mail: [onti@tgn.sfedu.ru](mailto:onti@tgn.sfedu.ru), <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2016

ИЗДАНИЕ ОСУЩЕСТВЛЕНО ПРИ ПОДДЕРЖКЕ  
РОССИЙСКОГО ФОНДА



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЗДЕЛ I. ЭВОЛЮЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

<b>А.Н. Орлов, В.В. Курейчик, А.Е. Глушенко</b> КОМБИНИРОВАННЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ.....	5
<b>Д.В. Заруба, Д.Ю. Запорожец</b> ГЕНЕРАЦИЯ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ ПОИСКОВЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ .....	13
<b>Ю.О. Чернышев, Н.Н. Венцов</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ИММУННЫМИ МЕТОДАМИ .....	25
<b>Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова</b> ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ.....	34
<b>В.В. Курейчик, А.Е. Глушенко, А.Н. Орлов</b> ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ 3-Х МЕРНОЙ УПАКОВКИ .....	45

### РАЗДЕЛ II. УПРАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯМИ

<b>В.В. Бова</b> ПОДХОД К СОЗДАНИЮ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА .....	54
<b>Ю.А. Кравченко, В.В. Марков, А.А. Новиков</b> СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК В SEMANTIC WEB.....	65
<b>Ю.А. Кравченко, И.О. Курситыс, Э.В. Кулиев</b> РАЗРАБОТКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СЕМАНТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ .....	75

### РАЗДЕЛ III. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

<b>В.В. Лисяк, Н.К. Лисяк, Д.А. Малуюков</b> О ЗАДАЧЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА САПР НА БАЗЕ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА .....	88
<b>С.Н. Щеглов</b> РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ, ИНСПИРИРОВАННЫХ ПРИРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ, ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ САПР.....	99
<b>Р.А. Нейдорф, М.Н.М. Мохсен, А.Р. Нейдорф</b> УНИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И СИНТЕЗА ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ.....	110
<b>Н.П. Воронова, С.М. Ковалев, А.Н. Шабельников</b> ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЙ НЕЧЕТКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	120

**РАЗДЕЛ IV. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ЭЛЕКТРОНИКА**

<b>С.В. Гаврилов, Д.И. Рыжова, А.Л. Сتمпковский</b> МАРШРУТ ЛОГИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ ДЛЯ КМОП ТЕХНОЛОГИЙ С ТРЕХМЕРНЫМ ЗАТВОРОМ ТРАНЗИСТОРА .....	131
<b>Ю.Р. Кузин, А.В. Калинин, Д.С. Гримак</b> МЕТОД КОРРЕКЦИИ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В МЕСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ .....	142
<b>Е.С. Балака, Д.А. Городецкий, В.С. Рухлов, А.Н. Щелоков</b> РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СУММАТОРОВ ПО МОДУЛЮ НА БАЗЕ КОМБИНАЦИОННЫХ СУММАТОРОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПЕРЕНОСОМ.....	158

## CONTENT

### SECTION I. EVOLUTIONAL SIMULATION

<b>A.N. Orlov, V.V. Kureychik, A.E. Glushchenko</b> COMBINED GENETIC ALGORITHM FOR A CUTTING PROBLEM .....	5
<b>D.V. Zaruba, D.Yu. Zaporozhets</b> GENERATION OF BIOINSPIRED SEARCH PROCEDURES FOR OPTIMIZATION PROBLEMS.....	14
<b>Yu.O. Chernyshev, N.N. Ventsov</b> USING FUZZY RESTRICTIONS WHEN SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS IMMUNE METHODS .....	25
<b>L.A. Gladkov, N.V. Gladkova</b> HYBRID ALGORITHM FOR SOLVING VEHICLE ROUTING PROBLEMS WITH A TIME WINDOWS .....	35
<b>V.V. Kureichik, A.E. Glushchenko, A.N. Orlov</b> HYBRID APPROACH FOR THREE-DIMENSIONAL PACKAGING PROBLEM .....	46

### SECTION II. KNOWLEDGE MANAGEMENT

<b>V.V. Bova</b> APPROACH TO THE CREATION OF KNOWLEDGE MANAGEMENT MODEL BASED ON GENETIC SEARCH METHODS .....	54
<b>Yu.A. Kravchenko, A.A. Novikov, V.V. Markov</b> SEMANTIC SEARCH IN SEMANTIC WEB.....	65
<b>Yu.A. Kravchenko, I.O. Kursityts, E.V. Kuliev</b> THE DEVELOPMENT OF GENETIC ALGORITHM FOR SEMANTIC SIMILARITY ESTIMATION IN TERMS OF KNOWLEDGE MANAGEMENT PROBLEMS.....	76

### SECTION III. SIMULATION AND DESIGN

<b>V.V. Lisyak, N.K. Lisyak, D.F. Malukolov</b> ON THE STRUCTURAL ANALYSIS OF CAD ON THE BASIS OF MARKOV PROCESS.....	88
<b>S.N. Shcheglov</b> DEVELOPMENT OF ALGORITHMS INSPIRED BY NATURAL SYSTEMS, FOR EFFECTIVE DECISION-MAKING TASKS CAD .....	100
<b>R.A. Neydorf, M.N.M. Mohsen, A.R. Neydorf</b> UNIFICATION PROBLEMS OF MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL OBJECTS AND SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL VARIABLES CONTROL LAWS .....	111
<b>N.P. Voronova, S.M. Kovalev A.N. Shabelnikov</b> IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF STATES FOR FUZZY DYNAMICAL SYSTEMS .....	120

### SECTION IV. COMPUTER ENGINEERING AND ELECTRONICS

<b>S.V. Gavrilov, D.I. Ryzhova, A.L. Stempkovskiy</b> THE FLOW OF THE LOGICAL AND PHYSICAL SYNTHESIS OF COMBINATIONAL CIRCUITS FOR CMOS TECHNOLOGY WITH 3D STRUCTURE OF THE TRANSISTOR .....	131
<b>Yu.R. Kuzin, A.V. Kalinin, D.S. Grimak</b> COMPENSATION OF THE SERVOMECHANISM USING MINOR FEEDBACK LOOP WITH CURRENT TRANSFORMER .....	142
<b>E.S. Balaka, D.A. Gorodecky, V.S. Rukhlov, A.N. Schelokov</b> DESIGN AND SYNTHESIS OF HIGH SPEED MODULO ADDERS USING PARALLEL PREFIX STRUCTURE.....	159

## Раздел I. Эволюционное моделирование

УДК 004.896

А.Н. Орлов, В.В. Курейчик, А.Е. Глущенко

### КОМБИНИРОВАННЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ\*

*Работа связана с решением одной из важных оптимизационных задач этапа автоматизированного проектирования – задачи раскроя листового материала. Она состоит из двух оптимизационных подзадач, задачи двухмерной упаковки геометрических фигур и задачи нахождения оптимального пути реза. Каждая из этих подзадач относится к классу NP- сложных и трудных проблем дискретной оптимизации. В статье описывается комбинированный подход к решению данной оптимизационной задачи на основе методов генетического поиска. Приведена постановка и ограничения задачи раскроя листового материала. Предложена новая архитектура поиска, основанная на комбинированном подходе, использующая многоуровневую эволюцию и позволяющая частично решить проблему предварительной сходимости алгоритмов. Разработаны модифицированные генетические алгоритмы упаковки и нахождения оптимального пути реза, позволяющие получать наборы квазиоптимальных решений, за полиномиальное время. Для эффективной работы генетических алгоритмов в статье описан механизм создания начальной популяции альтернативных решений. Предложена новая процедура кодирования – декодирования, позволяющая получать только «реальные» решения оптимизационной задачи раскроя листового материала. Разработан программный комплекс и проведен вычислительный эксперимент на тестовых примерах (бенчмарках). Качество раскроя материала, полученного, на основе комбинированного поиска, в среднем на 2 % превосходит результаты, полученные с использованием известных алгоритмов Cutter, Техтран и AJANCAM, что говорит об эффективности предложенного подхода. Проведенные серии тестов и экспериментов позволили уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов раскроя материала. В лучшем случае временная сложность алгоритмов  $O(n^2)$ , в худшем случае –  $O(n^3)$ .*

*Раскрой материала; двухмерная упаковка; нахождение минимального пути; комбинированный подход; генетический алгоритм; генетические операторы; эволюционный алгоритм.*

A.N. Orlov, V.V. Kureychik, A.E. Glushchenko

### COMBINED GENETIC ALGORITHM FOR A CUTTING PROBLEM

*The article deals with one of the most important optimization problems – the cutting stock and packaging (C&P) problem. This problem consists two subproblem, such as two-dimensional packaging and minimization of tool head way. Each of this problems belongs to the class of NP-hard and complex problems. In the article authors offered combined approach for solving this optimization problem based on genetic methods of search. The formulation and restrictions of the C&P problem are considered in the article. Authors offer a combined approach with using multi-level evolution, which partially allows to avoid a preliminary convergence of algorithms. The modified genetic algorithm (MGA) of packaging and the modified genetic algorithm minimization of tool head way is developed, which obtain sets of quasi-optimal solutions in polynomial time.*

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00242) в Южном федеральном университете.

*For effective work of genetic algorithms in the article describes process of creation initial population of alternative solutions. Authors offered new coding-decoding algorithm, which allows to receive only the "real" solutions of the optimization problem of cutting stock problem. To carry out computational experiments on test examples (benchmarks) authors developed a software on the basis of hybrid approach for the C&P problem. Quality of the C&P problem obtained on the basis of the developed hybrid approach is higher on average 2 % than packing results obtained using known algorithms suggested by AJANCAM, Cutter, TEHTRAN, which demonstrates the effectiveness of the proposed approach. Conducted tests and experiments allow possible to clarify theoretical estimations of algorithm time complexity. In the best case algorithms the time complexity is represented as  $O(n^2)$ , in the worst case –  $O(n^3)$ .*

*Cutting stock problem; two-dimensional packaging problem; finding of minimum way; combined approach; genetic algorithm; genetic operators; evolutionary algorithm.*

**Введение.** В настоящее время среди множества задач автоматизированного проектирования, ключевую позицию занимают задачи, связанные с раскроем и упаковкой в заданных областях объектов различного вида и имеющих различную физическую природу. Задача раскроя-упаковки относится к проблеме оптимизационного геометрического моделирования [1].

Задача раскроя-упаковки имеет широкое применение не только в конструкторском проектировании, но и в производстве. Эта задача решается при раскрое материала, размещении элементов на печатной плате, планировании кристалла, штамповки заготовок и т.п. в любой отрасли промышленности имеет важное практическое значение. Как разместить элементы на печатной плате, чтобы расход сырья был минимальным? Постановка такого рода вопросов является не случайной, поскольку уменьшение промышленных отходов приводит к снижению себестоимости продукции и, следовательно, к увеличению прибыли [2]. А использование в качестве сырья дорогостоящих материалов предъявляет все более жёсткие требования к качеству и методам решения задачи раскроя-упаковки.

От качества решения данной задачи зависит эффективность использования материала при раскрое, продуктивность использования высокопроизводительного раскройного оборудования, а так же время проектирования. Существует множество различных алгоритмов и методов раскроя-упаковки с учётом разнообразных критериев оптимизации [3].

Так как задача раскроя упаковки относится к классу NP-трудных, сложных проблем оптимизации, то необходима разработка эвристических методов, позволяющих получать квазиоптимальные решения за полиномиальное время [4]. Поэтому актуальной и важной задачей является разработка новых подходов, методов и алгоритмов, основанных на биоинспирированном поиске [5].

**Постановка задачи раскроя материала.** Оптимизационную задачу раскроя можно сформулировать следующим образом. Дана область раскроя (поле)  $M = \{m_x, m_y\}$ , где  $m_x$  и  $m_y$  задают границы области раскроя. Дано множество двумерных геометрических фигур  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  количеством  $N$ . Фигуры задаются множеством точек и представляют собой односвязные области, ограниченные замкнутой кривой (граничными контурами) [6].

Расположение каждого элемента  $A_i$  в области раскроя определяется следующими параметрами:  $x_{mini}$ ,  $y_{mini}$ ,  $\phi_i$ , где  $x_{mini}$  – проекция самой левой точки фигуры в некоторой системе координат;  $y_{mini}$  – проекция самой нижней точки в некоторой системе координат;  $\phi_i$  – параметр, задающий ориентацию (угол поворота) объекта на плоскости [7].

Задача раскроя материала формулируется так: необходимо выбрать некоторое количество геометрических объектов и уложить их на поверхность поля  $M$ , добиваясь уменьшения свободного пространства поля [8]. При этом размещение должно удовлетворять следующим ограничениям:

- ◆ суммарная площадь элементов не должна превышать площадь поля для их размещения:

$$\sum_{i=1}^n S_i \leq S_{\text{общ}}, \quad (1)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -го объекта расположенного на поверхности поля (суммарная площадь занятой части),  $S_{\text{общ}}$  – общая площадь поля;

- ◆ элементы не должны накладываться друг на друга:

$$f_{ij}(x_i, y_i, \varphi_i, x_j, y_j, \varphi_j, \dots, x_n, y_n, \varphi_n) \geq 0 \quad i \neq j; \quad i, j=1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

- ◆ элементы не должны выходить за границы поля:

$$\begin{cases} x_{\min i} \geq 0; \\ y_{\min i} \geq 0; \\ x_{\min i} \leq m_x; \\ y_{\min i} \leq m_y. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве критерия оптимизации будем использовать коэффициент использования материала (КИМ) или коэффициент раскроя [9]. Так как потери материала необходимо минимизировать, соответственно КИМ необходимо максимизировать. Коэффициент раскроя материала –  $k$  вычисляется по следующей формуле:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_{\text{общ}}}, \quad (4)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -го объекта расположенного на поверхности поля (суммарная площадь занятой части),  $S_{\text{общ}}$  – общая площадь поля.

Так как задача может содержать большую область раскроя и малое количества элементов [10], или же в процессе раскроя использовано множество листов и на последний лист было размещено малое количество элементов, следует вначале выделить деловой отход.

Деловой отход – отход который может быть использован в будущем в качестве раскраиваемой области и при подсчёте КИМ, он будет вычтен из  $S_{\text{общ}}$ . Деловым отходом является наибольшая прямоугольная площадь свободного листа [11].

Для качественного расчета коэффициента использования материала, необходимо рассчитать его теоретическое значение. В большинстве случаев достижение КИМ=1 является невозможным, поэтому приближение в результате решения задачи к целевой функции равной «1» является эффективным [12]. В связи с этим в статье предлагается эвристический комбинированный подход к решению задачи раскроя материала.

**Комбинированный подход к раскрою материала.** При решении конструкторских задач САПР, в том числе задачи раскроя-упаковки, комбинированный поиск даст преимущественно новые по показателям эффективности и качества решения [13].

Основной трудностью при решении любой оптимизационной задачи с большим числом локальных оптимумов, в том числе и задачи раскроя-упаковки, является предварительная сходимостью алгоритмов [14].

Последние исследования в области САПР показывают, что в связи с обработкой больших объемов данных необходимо использовать эвристические комбинированные методы основанные на предварительных знаниях о решаемых задачах [15].

В данной работе предлагается комбинированная архитектура раскроя материала на основе модифицированного генетического алгоритма, представленная на рис. 1.

Первым этапом поиска является ввод параметров, необходимых для работы генетического алгоритмов, такие как: количество областей раскроя, параметры областей раскроя, количество раскраиваемых элементов, параметры элементов [16]. В качестве воздействий со стороны внешней среды используются действия ЛПР–инженер, оператор задающий значения вводимых данных и параметров.



Рис. 1. Укрупнённая архитектура комбинированного поиска

Далее направленным способом (на основе эвристики) генерируется начальное множество альтернативных решений задачи раскроя-упаковки, которое является основой для работы модифицированных генетических алгоритмов [17]. Данная эвристика представляет собой последовательный алгоритм размещения элементов. На первом шаге рассчитывается площадь каждой фигуры. Затем формируется список, в котором все заданные элементы сортируются по убыванию площади. Первым элементом в списке будет элемент с наибольшей площадью. На следующем шаге этот элемент помещается в левый верхний угол поля. Второй элемент выбирается из приоритетного списка альтернативных решений на основе алгоритма [18], представленного на рис. 2. Процесс продолжается до тех пор, пока возможно заполнение данной области поля. Если дальнейшее размещение элементов невозможно, в соответствии с ограничениями, то данная часть поля отсекается и в дальнейшем рассмотрение не берётся. Полученное решение является первой хромосомой для начальной популяции [5, 14, 19]. Путем изменения только углов поворота каждого элемента осуществляется создание начальной популяции. Поскольку для  $N$  элементов имеем  $k$ -углов поворота, то размер популяции будет равен  $k^N$ . Это приводит к разнообразию генетического материала.

На следующем этапе выполняется реализация генетического поиска. В генетическом алгоритме новые решения в популяции формируются на основе выполнения различных модифицированных генетических операторов, таких как кроссинговер, мутация, редукция [3, 5, 14]. Данный алгоритм позволяет наборы квазиоптимальных решений за полиномиальное время [20].

Отметим, что блок адаптации отвечает за подбор и расчет параметров работы генетического алгоритма. Например, с помощью него рассчитываются вероятности применения различных операторов на стадии генетического алгоритма.

В данном алгоритме критерием останова служит заданное количество итераций. Если критерий останова достигнут, осуществляется сохранение лучшего результата.

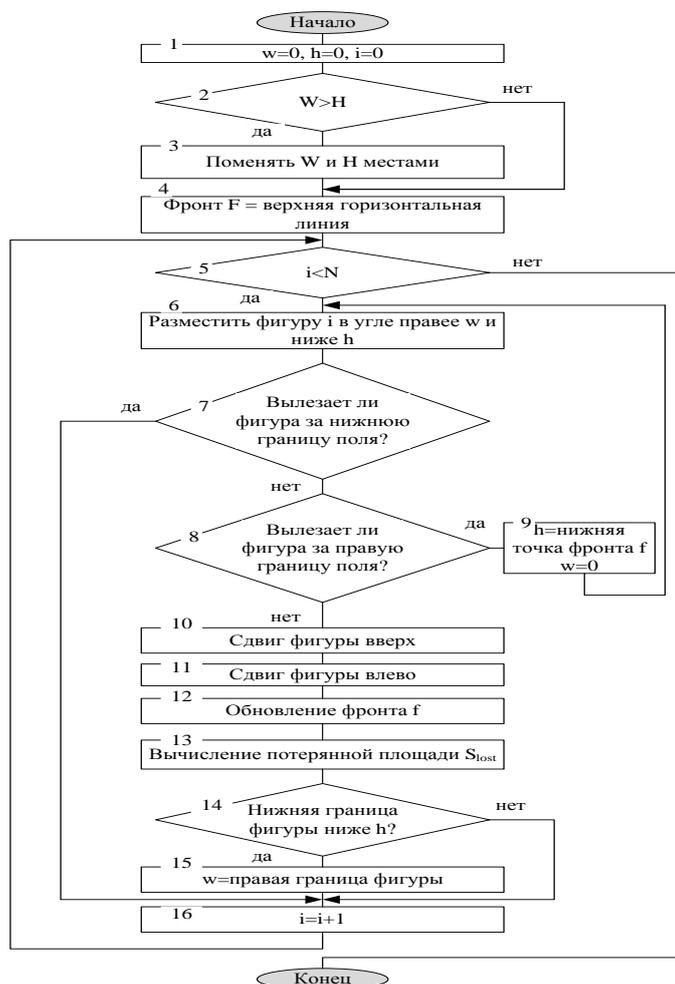


Рис. 2. Алгоритм декодирования альтернативных решений

Применение такой стратегии поиска имеет следующие преимущества: позволяют быстрее и эффективнее находить оптимальные решения, работают не с одним решением, а с множеством альтернативных решений, присутствует возможность рассматривать более перспективные и удалять заранее неперспективные решения и не требуют знания о предоставлении дополнительной информации.

**Вычислительный эксперимент.** Для реализации разработанных алгоритмов была разработана программа в среде Embarcadero RAD Studio на языке C++ для 64 разрядной операционной системы Windows 7, которая позволяет пользователю решать задачу раскроя материала. Отладка и тестирование разработанных алгоритмов выполнялось на компьютере типа IBM PC с процессором IntelCore i5-3570 CPU с ОЗУ-8Гб. Проведен вычислительный эксперимент.

Для определения эффективности разработанного комбинированного подхода были проведены исследования времени и качества решения для разного набора тестовых примеров (бенчмарков), различающихся количеством блоков. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

## Сравнение комбинированного алгоритма с аналогами

Количество элементов	Комбинированный поиск	AJANCAM	Техтран	Cutter
эл.	%	%	%	%
100	84	83	84	82
200	87	85	86	83
300	86	82	85	81
400	84	83	84	82
500	88	85	88	83
Среднее значение	85,8	83,6	85,4	82,2

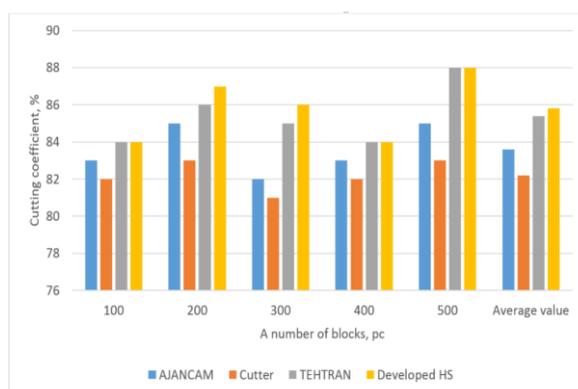


Рис. 3. Гистограмма сравнения эффективности раскроя элементов тестовых схем различными алгоритмами

Качество упаковки, полученное, на основе разработанного комбинированного подхода, в среднем на 2 % превосходит результаты раскроя, полученные с использованием известных программ AJANCAM, Cutter и Техтран что говорит об эффективности предложенного подхода. Проведенные экспериментальные расчеты показали, что комбинированный подход позволяет получать набор локально-оптимальных решений за полиномиальное время и в общем случае решать проблему предварительной сходимости.

**Заключение.** Разработан комбинированный подход для решения задачи раскроя материала. Отличительной особенностью данного подхода является использование модифицированных генетических алгоритмов, а так же разработанная процедура кодирования-декодирования. Такой подход позволяет получать наборы оптимальных и квазиоптимальных решений за полиномиальное время и частично решать проблему предварительной сходимости алгоритмов. Разработана программная среда на языке C++. Проведен вычислительный эксперимент. Проведенные серии тестов и экспериментов позволили уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов. В лучшем случае временная сложность алгоритмов  $O(n^2)$ , в худшем случае –  $O(n^3)$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sherwani N.A.* Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher, USA, 2013.
2. *Фроловский В.Д.* Оптимальное группирование геометрических объектов при проектировании карт раскроя материалов // Программные продукты и системы. – 2000. – № 3. – С. 47-48.

3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
4. Курейчик В.В., Бова В.В., Курейчик Вл.Вл. Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 90-94.
5. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.
6. Курейчик В.М., Курейчик Л.В. Комплексный метод упаковки блоков // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2015. – № 1 (21). – С. 17-26.
7. Мухачева Э.А., Верхотуров М.А., Мартынов В.В. Модели и методы расчета раскроя – упаковки геометрических объектов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 216 с.
8. Петунин А.А., Полево А.В., Куреннов Д.В. Об одном подходе к решению задач раскроя-упаковки // Конструирование и технология изготовления машин: Сборник научных трудов. – Ч. 2. Вестник УГТУ – УПИ. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ. – 2005. – №. 18 (70). – С. 212-216.
9. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
10. Орлов А.Н., Курейчик В.В., Кудрякова Т.Ю. Генетический алгоритм прямоугольной упаковки // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'15». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 3. – С. 207-212.
11. Орлов А.Н., Курейчик В.В., Кудрякова Т.Ю. Комбинированный алгоритм решения задачи прямоугольного раскроя // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'15». Научное издание в 3-х т. Т. 3. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 212-217.
12. Орлов А.Н., Кудрякова Т.Ю. Комбинированный модифицированный генетический алгоритм решения задачи раскроя материала // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей I Всероссийской научно-технической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов. – 2015. – С. 417-419.
13. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. – ФГУП Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского, 2007.
14. Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл. Биоинспирированный поиск при проектировании и управлении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 178-183.
15. Muhlenbein H. Parallel Genetic Algorithms, Population Genetics and Combinatorial Optimization // Proc. of the Third International Conference on Genetic Algorithms. SanMateo. MorganKaufmann, 1989. – 576 p.
16. Подлазова А.В. Генетические алгоритмы на примерах решения задач раскроя // Проблемы управления. – 2008. – № 2. – С. 58-63.
17. Falkenauer E.A. Genetic Algorithm for Bin Packing and Time Balancing // In: Proc. Of the IEEE 1992 International Conference on Robotics and Automation (RA92), Nice, 1992.
18. Орлов А.Н., Курейчик В.В. Механизм кодирования-декодирования при решении задачи прямоугольного раскроя-упаковки материала // Сборник научных статей Всероссийской молодежной школы семинара «Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники - 2015». – Таганрог: Изд-во НОЦ ЗИС КТ ЮФУ, 2015. – С. 420-428.
19. Kuliev E.V., Dukhardt A.N., Kureychik V.V., Legebokov A.A. Neighborhood Research Approach in Swarm Intelligence for Solving the Optimization Problems // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium – (EWDTS'2014) Kiev, Ukraine, September 26–29, 2014. – P. 112-115.
20. Garey M.R., Graham R.L., Johnson D.S., Yao A.C. Resource constrained scheduling as generalized bin packing // J. Combinatorial Theory. – Ser. A21. – P. 257-298.

## REFERENCES

1. Sherwani N.A. Algorithms for VLSI Physical Design Automation. Third Edition, Kluwer Academic Publisher, USA, 2013.
2. Frolovskiy V.D. Optimal'noe gruppирование geometricheskikh ob'ektov pri proektirovanii kart raskroya materialov [Optimal grouping of geometric objects saving under maps in the material cutting], *Programmye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2000, No. 3, pp. 47-48.

3. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
4. Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.V. Kombinirovannyi poisk pri proektirovanii [Combined search in the design], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational Resources and Technology], 2014, No. 2 (5), pp. 90-94.
5. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 384 p.
6. Kureychik V.M., Kureychik L.V. Kompleksnyy metod upakovki blokov [Integrated packing method units], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Computer science, computer engineering and engineering education], 2015, No. 1 (21), pp. 17-26.
7. Mukhacheva E.A., Verkhoturov M.A., Martynov V.V. Modeli i metody rascheta raskroya – upakovki geometricheskikh ob"ektov [Models and methods of calculation of cutting – packing of geometric objects]. Ufa: UGATU, 1998, 216 p.
8. Petunin A.A., Polevov A.V., Kurenov D.V. Ob odnom podkhode k resheniyu zadach raskroya-upakovki [About one approach to solving the problems of cutting-packaging], *Konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya mashin: Sbornik nauchnykh trudov* [Design and fabrication of machines: Collection of scientific works]. Part 2. Vestnik UGTU – UPI. Ekaterinburg: UGTU – UPI, 2005, No. 18 (70), pp. 212-216.
9. Emel'yanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary simulation]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p.
10. Orlov A.N., Kureychik V.V., Kudryakova T.Yu. Geneticheskiy algoritm pryamougol'noy upakovki [Genetic algorithm for rectangular packing], *Trudy Kongressa po intellektual'nykh sistemam i informatsionnykh tekhnologiyam «IS&IT'15»* [Proceedings of Congress on intelligent systems and information technologies "IS&IT'15"]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, Vol. 3, pp. 207-212.
11. Orlov A.N., Kureychik V.V., Kudryakova T.Yu. Kombinirovannyi algoritm resheniya zadachi pryamougol'nogo raskroya [A combined algorithm for solving the rectangular cutting], *Trudy Kongressa po intellektual'nykh sistemam i informatsionnykh tekhnologiyam «IS&IT'15»* [Proceedings of Congress on intelligent systems and information technologies "IS&IT'15"]. Scientific publication in 3 vol. Vol. 3. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 212-217.
12. Orlov A.N., Kudryakova T.Yu. Kombinirovannyi modifitsirovannyi geneticheskiy algoritm resheniya zadachi raskroya materiala [Combined modified genetic algorithm for solving the problem of nesting material], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Sbornik statey I Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Fundamental and applied aspects of computer technologies and information security: a Collection of articles I all-Russian scientific-technical conference of young scientists, postgraduates and students], 2015, pp. 417-419.
13. Batishchev D.I., Neymark E.A., Starostin N.V. Primeneniye geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach diskretnoy optimizatsii [Application of genetic algorithms to the solution of problems of discrete optimization]. FGUP Nizhegorodskiy gosudarstvennyy universitet im. N.I. Lobachevskogo, 2007.
14. Kureychik V.V., Kureychik V.V. Bioinspirirovannyi poisk pri proektirovanii i upravlenii [Search inspired by natural systems, for the design and management], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 178-183.
15. Muhlenbein H. Parallel Genetic Algorithms, Population Genetics and Combinatorial Optimization, *Proc. of the Third International Conference on Genetic Algorithms*. SanMateo. MorganKauffmann, 1989 576 p.
16. Podlazova A.V. Geneticheskie algoritmy na primerakh resheniya zadach raskroya [Genetic algorithms on the examples of solving problems cutting], *Problemy upravleniya* [Problems of Management], 2008, No. 2, pp. 58-63.
17. Falkenauer E.A. Genetic Algorithm for Bin Packing and Time Balancing, *In: Proc. Of the IEEE 1992 International Conference on Robotics and Automation (RA92), Nice, 1992*.
18. Orlov A.N., Kureychik V.V. Mekhanizm kodirovaniya-dekodirovaniya pri reshenii zadachi pryamougol'nogo raskroya-upakovki materiala [The mechanism of encoding-decoding when solving tasks of the rectangular cutting-packing material], *Sbornik nauchnykh statey Vserossiyskoy molodezhnoy shkoly seminar «Aktual'nye problemy informatsionnykh tekhnologiy, elektroniki i radiotekhniki - 2015»* [Collection of scientific articles of the all-Russian youth school-seminar "Actual problems of information technologies, electronics and radio engineering - 2015"]. Taganrog: Izd-vo NOTs ZIS KT YuFU, 2015, pp. 420-428.

19. Kuliev E.V., Dukkardt A.N., Kureychik V.V., Legebokov A.A. Neighborhood Research Approach in Swarm Intelligence for Solving the Optimization Problems, *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium – (EWDTS'2014) Kiev, Ukraine, September 26–29, 2014*, pp. 112-115.
20. Garey M.R., Graham R.L., Johnson D.S., Yao A.C. Resource constrained scheduling as generalized bin packing, *J. Combinatorial Theory. Ser. A21*, pp. 257-298.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

**Орлов Антон Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ky92@mail.ru; 347924, г. Таганрог, ул. Воскова, 111/а, кв. 2; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Курейчик Владимир Викторович** – e-mail: vkur@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Глущенко Александр Евгеньевич** – e-mail: alex-14-93@mail.ru; 347939, г. Таганрог, ул. Сызранова, 10, кв. 97; тел.: 89612941882; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Orlov Anton Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: ky92@mail.ru; 111/a, Voskova street, ap. 2, Taganrog 347924, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; postgraduate student.

**Kureichik Vladimir Victorovich** – e-mail: vkur@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Glushchenko Alexander Evgenyevich** – e-mail: alex-14-93@mail.ru; 10, Syzranova street, ap. 97, Taganrog, 347939, Russia; phone: +79612941882; the department of computer aided design; postgraduate student.

УДК 004.896

**Д.В. Заруба, Д.Ю. Запорожец**

### **ГЕНЕРАЦИЯ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ ПОИСКОВЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ\***

*Рассматриваются проблемы использования принципов поведения объектов живой природы для решения NP-полных оптимизационных задач. В качестве наиболее перспективных рассматриваются методы и алгоритмы на основе роевого интеллекта. Для решения проблемы баланса между скоростью сходимости и широтой поиска применяются механизмы адаптации. Методы адаптации осуществляют закономерное изменение значений настроечных параметров алгоритмов таким образом, что обеспечивается последовательный переход от диверсификации на начальных этапах работы биоинспирированного алгоритма к интенсификации на заключительных итерациях. В статье предложена подсистема генерации новых гибридных алгоритмов на основе методов биоинспирированного поиска. Предложена архитектура подсистемы, включающая в себя блоки управления данными об алгоритме, решаемой задаче, а так же модуля автоматизации процесса генерации новых поисковых процедур. В статье предлагается новый оптимизационный подход, основанный на механизме гибридизации различных атомарных поисковых процедур. Данный модуль основан на механизмах генетического поиска и генетического программирования. Для обеспечения работоспособности модуля генерации новых решений автором построены новые механизмы кодирования и декодирования стандартизированного представ-*

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00242) в Южном федеральном университете.

ления алгоритма оптимизации. Они позволяют представлять стандартные описания в виде альтернативных решений (хромосом). В статье предлагается новый подход к описанию структуры данных, основанной на XML описании. В качестве структуры данных в хромосоме предлагается использовать обратную польскую нотацию (форма записи выражений, в которой операнды расположены перед знаками операторов). Результатом работы данного модуля и подсистемы в целом является исполняемый алгоритм решения оптимизационных задач.

*Роевые методы оптимизации; атомарная поисковая процедура; биоинспирированный поиск; XML; обратная польская нотация.*

**D.V. Zaruba, D.Yu. Zaporozhets**

### **GENERATION OF BIOINSPIRED SEARCH PROCEDURES FOR OPTIMIZATION PROBLEMS**

*The paper deals with the problem of using the principles of behavior of wildlife objects to solve NP-complete optimization problems. The most promising deals with methods and algorithms based on swarm intelligence. To solve the problem of the balance between the rate of convergence and the breadth of the search mechanisms of adaptation are applied. adaptation techniques, the regular change in the algorithm tuning parameters values in a way that ensures a gradual transition from the diversification in the early stages of bioinspired algorithm to intensify in the final iteration. The paper proposes a new hybrid generation subsystem of algorithms based on bioinspired search methods. The architecture of a subsystem, including a data control about the algorithm of the problem, as well as the module automate the process of generating new search procedures. The paper proposes a new optimization approach based on the mechanism of hybridization of different atomic search procedures. This module is based on the mechanisms of genetic research and genetic programming. To ensure the efficiency of the module generating new solutions by the author constructed new mechanisms of encoding and decoding of a standardized presentation of the optimization algorithm. They allow you to provide standard descriptions in the form of alternative solutions (chromosomes). The paper proposes a new approach to the description of the data structure based on the XML description. As a data structure in the chromosome are encouraged to use reverse Polish notation (form of the expression, in which the operands are located in front of characters operators). The result of this module, and subsystems as a whole is an executable algorithm for solving optimization problems.*

*Swarm optimization methods; atomic search procedure; bioinspired search; XML; reverse Polish notation.*

**Введение.** Для эффективного решения задач глобальной оптимизации в 1980-х гг. начали интенсивно разрабатывать класс стохастических поисковых алгоритмов оптимизации, которые называют биоинспирированными алгоритмами. К ним можно отнести алгоритм роя частиц, колонии муравьев, роя пчел, роя светлячков и др. В условиях быстрого прогресса в области информационных технологий классические оптимизационные алгоритмы не позволяют находить эффективные решения или требуют большое количество процессорного времени для их поиска [1]. Для повышения эффективности и качества решения задач глобальной оптимизации целесообразна разработка подсистемы, позволяющей генерировать биоинспирированные поисковые процедуры на основе генетического и пчелиного алгоритмов.

Биоинспирированные алгоритмы предполагают параллельную проработку сразу нескольких альтернативных решений задачи оптимизации и представляют собой альтернативу классическим поисковым алгоритмам, которые работают только с одним решением поставленной оптимизационной задачи. Все биоинспирированные алгоритмы относятся к классу эвристических алгоритмов, то есть алгоритмов, для которых теоретически не доказана сходимости к глобальному оптимуму, но эмпирически установлено, что вероятность получения оптимального или квазиоптимального решения высока [2].

**1. Общие положения теории биоинспирированного поиска.** В качестве общего названия элементов популяции предлагается использовать термин агент. В различных биоинспирированных алгоритмах агенты называются хромосомами, муравьями, бактериями, пчелами и т.д. Совокупность агентов называется популяцией.

Для получения начальной популяции могут быть применены детерминированные или случайные алгоритмы. При формировании начальной популяции агентами покрывается по возможности вся область поиска.

Одним из основных преимуществ биоинспирированных алгоритмов является их модульная структура. Такой подход позволяет быстро получить большое число новых вариантов алгоритма за счет разработки новых и модификации имеющихся правил инициализации и генерации новых агентов.

Одной из основных проблем создания биоинспирированных алгоритмов является баланс между скоростью сходимости алгоритма (интенсификацией) и диверсификацией поиска (разнообразием агентов). Высокая скорость сходимости требует уменьшение разнообразия агентов в популяции, а диверсификация, наоборот, отвечает за более широкий набор агентов, покрывающих все пространство поиска, а значит и высокую вероятность нахождения глобального решения задачи [1, 2]. Принцип диверсификации должен обеспечивать сохранность разнообразия агентов популяции на протяжении как можно большего количества итераций биоинспирированного алгоритма.

Одним из подходов для решения проблемы баланса между скоростью сходимости и шириной поиска являются механизмы адаптации. Методы адаптации осуществляют закономерное изменение значений настроечных параметров алгоритмов таким образом, что обеспечивается последовательный переход от диверсификации на начальных этапах работы биоинспирированного алгоритма к интенсификации на заключительных итерациях.

На сегодняшний день перспективным средством создания биоинспирированных алгоритмов является гибридизация бионических алгоритмов с целью получения новых структур, повышающих вероятность нахождения глобального оптимума за счет достижения баланса между интенсификацией и диверсификацией на разных этапах гибридного поиска [1, 3–5].

**2 Архитектура подсистемы генерации биоинспирированных поисковых процедур.** На рис. 1 представлена обобщенная архитектура подсистемы генерации биоинспирированных поисковых процедур.

В блоке 1 ЛПР вводит стандартизированные описания начальных иерархических поисковых механизмов, а также атомарные поисковые процедуры (АПП) в виде, необходимом для подсистемы. Данные об АПП сохраняются в базу данных АПП (БДАПП), а стандартизированные описания передаются непосредственно на модуль генерации иерархических поисковых процедур.

На втором этапе (Блок 2) подсистема на основании входных данных генерирует новые иерархические процедуры. Используется весь спектр АПП, хранящийся в БДАПП. На третьем этапе (Блок 3) происходит сборка полученной иерархической поисковой процедуры.

В качестве входных данных выступают результаты работы блока 2 в виде стандартизированного описания, а так же данные, полученные в блоке 5. В блоке 5 ЛПР предлагается определить функции создания начального закодированного решения, а также функцию расчета целевой функции calculate() [1, 4]. Обе эти функции необходимо реализовывать с учетом поставленной задачи. Функция генерации начального закодированного решения в общем случае состоит из двух этапов: поиск решения и его кодирования [5]. Очевидно, что также перед ЛПР стоит задача определения функций кодирования и декодирования. Модуль сборки преобразует записанную в XML-файле информацию в конечную последовательность действий, которая выполняется в Блоке 4, а результатом ее работы является исполняемый алгоритм оптимизации.

Блок 4 представляет собой модуль тестирования и получения результатов.

Блок 6 отвечает за вывод данных конечному пользователю. Используя данный модуль, ЛПР может получить всю информацию о процессе генерации алгоритма, стандартизированное описание полученного иерархического механизма, исполняемый алгоритм в виде подключаемой библиотеки и информацию о значениях настроечных параметров, использовавшихся в ходе получения новых иерархических механизмов.

Проведя анализ полученной архитектуры можно сделать вывод, что наиболее трудоемким для ЛПР являются этапы ввода исходной информации. На этом этапе ЛПР необходимо разработать оптимизационную иерархию, вычислить теоретические оценки эффективности, переложить алгоритм на предложенное стандартизированное описание. Данная информация вводится единожды и может быть использована и модифицирована в последующем в рамках разрабатываемой подсистемы.

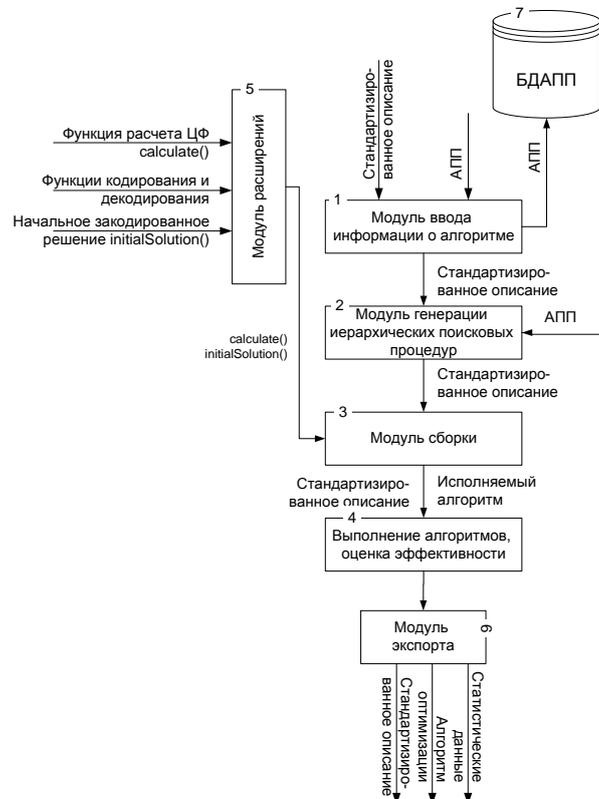


Рис. 1. Обобщенная архитектура подсистемы генерации биоинспирированных поисковых процедур

В статье предлагается новый оптимизационный подход, основанный на механизме гибридизации различных АПП. Под АПП будем понимать алгоритм, имеющий унифицированное описание (интерфейс), принимающий на вход закодированное решение и возвращающий на выходе одно или несколько оптимальных или квазиоптимальных закодированных решений. Интерфейс АПП (АПП<sub>инт</sub>) выглядит следующим образом:

$$\text{АПП}_{\text{инт}} = \langle id, solution, objectiveFunction, attributesList \rangle,$$

где `id` – идентификатор алгоритма; `solution` – начальное закодированное решение; `objectiveFunction` – целевая функция; `attributeList` – список атрибутов, необходимых для работы алгоритма (например, в качестве атрибута может выступать количество итераций).

С целью создания эффективной иерархической архитектуры на основе АПП, автор вводит язык описания поисковой иерархии на основе стандартного языка расширяемой разметки XML (2008) [6].

Для того чтобы при создании иерархической поисковой архитектуры имелась возможность создавать последовательные и параллельные поисковые процедуры предлагается ввести следующие сущности: `flow`–сущность, описывающая глобальную процедуру поиска, и `subflow`–сущность, описывающая различные процессы, происходящие в рамках глобальной поисковой процедуры. Для обеспечения взаимодействия автор предлагает использовать различные виды отношений. Опишем возможные отношения между введенными сущностями. Отношение `parent` – указывает на сущность, которая является родительской для текущей сущности. Родительская сущность – сущность, которая инициирует работу текущей сущности после завершения своей работы. Соответственно отношение `child` – указывает на сущность, которая является дочерней для текущей сущности.

Сущность `foreach` вводится для того, чтобы появилась возможность динамического запуска нескольких процессов.

Рассмотрим наглядный пример, демонстрирующий возможности предложенного описания иерархических оптимизационных процедур. На первом этапе поиска оптимизация происходит с использованием пчелиного алгоритма (ПА), далее полученные квазиоптимальные решения оптимизируются с помощью генетического алгоритма (ГА). Введем функцию генерации начального закодированного решения `initialSolution()` и функцию расчета целевой функции – `calculate()`. Необходимыми параметрами работы пчелиного алгоритма являются количество итераций – `iteration = 100`, количество блоков разбиения `block = 10` и количество пчел-фуражиров – `bees = 500`. Параметрами работы генетического алгоритма являются так же количество итераций – `iteration = 50`, размер популяции – `population = 100`. Приведенные параметры и их значения приведены в качестве примера. Формализуем алгоритмы в соответствии с предложенным интерфейсом АПП и введенными сущностями XML. Пчелиный алгоритм примет вид:

```
<search id="beeAlgorithm" solution="initialSolution()"
objectiveFunction="calculate()" attributesList="iteration=100,block=10,bees=500" />
```

Описание генетического алгоритма примет следующий вид:

```
<search id="geneticAlgorithm" solution="result(beeAlgorithm)"
objectiveFunction="calculate()" attributesList="iteration=50,population=100"/>
```

где `result(beeAlgorithm)` – результат, полученный с помощью пчелиного алгоритма. Тогда XML-описание предложенного алгоритма, представленное в табл. 1, примет вид, приведенный ниже и на рис. 3.

В данном случае сущностью, содержащей атрибут `parent="InitialPoint"` является сущность

```
<flowid="mainFlow" parent="InitialPoint" child = "beeAlgorithmFlow">
```

(строка 3, табл. 1), где `mainFlow` – идентификатор глобального поискового процесса.

Данная сущность запускает процесс с идентификатором `beeAlgorithmFlow`, о чем говорит атрибут `child="beeAlgorithmFlow"`. В рамках данного процесса запускается непосредственно АПП `beeAlgorithm` с описанными ранее параметрами. После окончания работы АПП `beeAlgorithm` запускается работа генетическо-

го алгоритма `<subflow id = "geneticAlgorithmFlow" child = "geneticAlgorithm" parent = "beeAlgorithmFlow">` (строка 7, табл. 1), так как соответствующий процесс имеет атрибут `parent = "beeAlgorithmFlow"`.

Таблица 1

## Пример XML-описания

1	<code>&lt;algorithm&gt;</code>
2	<code>&lt;start id="InitialPoint"/&gt;</code>
3	<code>&lt;flow id="mainFlow" parent="InitialPoint" child="beeAlgorithmFlow"&gt;</code>
4	<code>&lt;subflow id="beeAlgorithmFlow" child="beeAlgorithm"&gt;</code>
5	<code>&lt;search id="beeAlgorithm" solution="initialSolution()" objectiveFunction="calculate()" attributesList="iteration=100,block=10,bees=500"/&gt;</code>
6	<code>&lt;/subflow&gt;</code>
7	<code>&lt;subflow id="geneticAlgorithmFlow" child="geneticAlgorithm" parent="beeAlgorithmFlow"&gt;</code>
8	<code>&lt;search id="geneticAlgorithm" solution="result(beeAlgorithm)" objectiveFunction="calculate()" attributesList="iteration=50,population=100"/&gt;</code>
9	<code>&lt;/subflow&gt;</code>
10	<code>&lt;/flow&gt;</code>
11	<code>&lt;end id="finishPoint" parent="mainFlow"/&gt;</code>
12	<code>&lt;/algorithm&gt;</code>

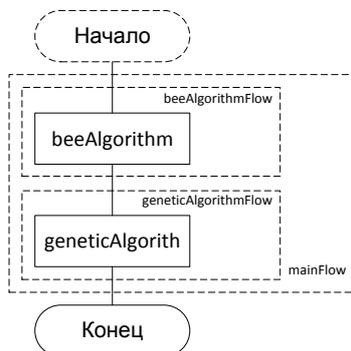


Рис. 2. Представление XML-описания в виде блок-схемы

По окончании работы генетического алгоритма заканчивается работа и всего flow с идентификатором `mainFlow` в целом. Данное событие вызывает завершение работы алгоритма, `<end id="finishPoint" parent="mainFlow"/>` (строка 11, табл. 1), так как метка `end id="finishPoint"` ссылается на родительскую сущность `mainFlow` (`parent="mainFlow"`).

**3. Автоматизация процесса генерации стандартизированного представления алгоритмов оптимизации.** В общем случае процесс автоматизации процесса генерации стандартизированного представления алгоритма оптимизации (СПАО) состоит из следующих этапов:

1. Определение множества АПП( $a_i$ ). На данном этапе ЛПР определяет множество всех атомарных поисковых процедур, которые могут быть включены в конечный алгоритм оптимизации.

2. Определение функции оценки результирующего алгоритма оптимизации  $\Theta(\psi(F))$ , где  $F$  – результирующий алгоритм оптимизации,  $\psi$  – функция оценки (критерий) с известным глобальным или квазиоптимальным значением.

$$\Theta = \psi_{best} - \psi_{result}$$

где  $\psi_{best}$  – известное глобальное или квазиоптимальное решение,  $\psi_{result}$  – лучшее решение, полученное разрабатываемым генетическим алгоритмом. Очевидно, что для задачи минимизации при  $\Theta < 0$  результирующий алгоритм (СПАО) является не эффективным, по сравнению с тем, с помощью которого было получено значение  $\psi_{best}$ . В качестве оценок для сравнения целесообразно применять бэнчмарки.

3. Ввод ограничений  $C(c_i)$ . К ограничениям можно отнести временные ограничения, а также ограничения, специфичные для решаемой задачи.

4. Вид решения VIEW, с которым будет работать алгоритм оптимизации. Другими словами, необходимо определить структуру данных, которая будет подаваться на вход алгоритма и приниматься на выходе.

В данной статье для упрощения процесса генерации стандартизированных описаний алгоритма предлагается использовать следующие допущения:

1. В качестве функции оценки  $\psi(F)$  использовать скалярные математические функции, например функцию Экли, Растригина, Швевеля и др. Данные функции широко применяются в международном научном сообществе для оценки качества получаемых оптимизационных механизмов.

2. В качестве поискового механизма для получения новых алгоритмов оптимизации применять генетический алгоритм с модифицированными генетическими операторами. Выбор генетического алгоритма обусловлен тем, что стандартизированное описание алгоритмов оптимизации легко записать в виде хромосомы; количество АПП в искомом алгоритме не превышает 10–15 элементов, что делает вероятность нахождения глобального оптимума высокой; временная сложность генетических алгоритмов невысока для малого числа входных данных; в результате работы алгоритма получается множество альтернативных решений, что дает возможность ЛПР выбрать лучший, с его точки зрения, алгоритм.

3. Вид решений VIEW будет представлен в виде числовой, бинарной или векторной хромосомы (в зависимости от количества аргументов функции  $\psi(F)$ ).

Для обеспечения работоспособности модуля генерации новых решений автором построены новые механизмы кодирования и декодирования СПАО. Они позволяют представлять стандартные описания в виде альтернативных решений (хромосом). Разрабатываемая структура кодирования или декодирования должна соответствовать следующим требованиям [7–9]:

- ◆ скорость кодирования и последующего декодирования. Временная сложность алгоритмов кодирования / декодирования не должна превышать  $n \log(n)$ . Данный факт обусловлен тем, что генетические алгоритмы работают с большим набором альтернативных решений, каждое из которых должно быть закодировано и декодировано как минимум один раз целью его оценки;
- ◆ целостность данных. Алгоритмы кодирования и декодирования должны быть реализованы таким образом, чтобы после последовательного применения методов кодирования и декодирования исходное решение было идентично результирующему;
- ◆ простота кодированного представления. СПАО должно быть закодировано в таком виде, чтобы легко было автоматически вносить случайные изменения (оператор мутации) и объединять два СПАО в один (оператор скрещивания).

Для того чтобы создать эффективный механизм кодирования и декодирования СПАО предлагается использовать элементы теории генетического программирования (ГП) [10–12]. Традиционно, любой алгоритм легко представить в виде

дерева. В древовидном кодировании каждый узел дерева содержит функцию, а каждый лист – операнд. Выражение, представленное в виде дерева, может быть легко рекурсивно посчитано [13, 14].

Применительно к решаемой задаче узлы дерева интерпретируются как связи между АПП, а листья – как сами АПП. Для уменьшения количества кодируемой информации и упрощения работы генетических операторов автором предлагается использовать двухуровневый механизм кодирования [13,14]. На первом уровне выполняется процедура упрощения, на второй кодирование упрощенного СПАО.

Процедура упрощения заключается в следующем. Стандарт XML-описания обязывает применять дополнительные сущности для структурирования СПАО. Такие структуры, как `algorithm`, `start`, `end`, `flow` и `subflow`, обязательны для XML документа, но имеют избыточность при работе алгоритма генерации СПАО. Поэтому в данной работе предлагается удалить избыточные данные при кодировании. Рассмотрим пример, приведенный в табл. 1. После упрощения описание примет вид представленный в табл. 2.

Таблица 2

#### Пример XML-описания

1.	<code>&lt;search id="beeAlgorithm" solution="initialSolution()" objectiveFunction="calculate()" attributesList="iteration=100,block=10,bees=500"/&gt;</code>
2.	<code>&lt;search id="geneticAlgorithm" solution="result(beeAlgorithm)" objectiveFunction="calculate()" attributesList="iteration=50,population=100"/&gt;</code>

В соответствии с данными табл. 2 представление СПАО в виде дерева примет вид, представленный на рис. 3.

На рис. 3 вершина S указывает на отношения между алгоритмами. Введем два типа отношений S – последовательный и P – параллельный. Также отметим, что отношения не являются коммутативными, из чего следует, что порядок операндов имеет значение. Касательно примера, изображенного на рис. 3, справедливо утверждение, что результат работы `beeAlgorithm` является исходными данными для `geneticAlgorithm`.

В качестве структуры данных в хромосоме предлагается использовать обратную польскую нотацию (ОПН). ОПН — форма записи выражений, в которой операнды расположены перед знаками операторов. Под операндами автор понимает АПП, а под операторами – отношения между АПП [14].

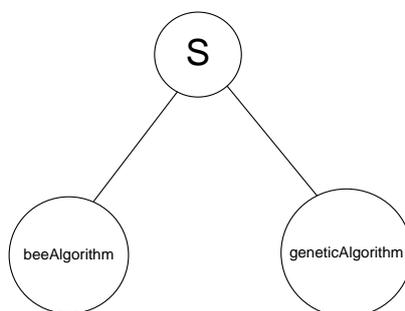


Рис. 3. Представление упрощенного СПАО в виде дерева

**4. Разработка генетического алгоритма для генерации иерархических поисковых процедур.** Для решения задачи автоматизированной генерации иерархического алгоритма оптимизации предлагается использовать модифицированный генетический алгоритм [15–17]. В качестве входных данных используются уже разработанные иерархические структуры. Целью автоматизированной генерации является автоматическое создание новых многоуровневых поисковых механизмов путем скрещивания имеющихся результатов с последующей оценкой времени их работы и качества решений, благодаря запуску новых алгоритмов для нахождения глобального оптимума для скалярных функций [3, 5, 9].

На первом этапе ЛПР производит выбор начальных данных (поисковых механизмов) для последующей работы генетического алгоритма автоматизированной генерации иерархических поисковых процедур. Данные процедуры представлены в виде стандартизированного описания, предложенного выше, и могут быть легко кодированы и декодированы в виде, необходимом для работы генетического алгоритма. Выбор поисковых механизмов является важным шагом, поскольку некоторые свойства начальных данных будут переданы потомкам в результате работы генетических операторов [5, 7].

На следующем шаге система генерации создает список используемых АПП, производит поиск значений необходимых настроечных параметров в БДАПП. После ЛПР предлагается уточнить значения найденных параметров и ввести значения недостающих. К данным параметрам относятся вероятности использования генетических операторов, количество итераций и т.д. [4, 8].

При получении всей необходимой информации система генерации производит операцию расчета значений целевых функции (оценок) для каждого иерархического оптимизационного алгоритма с последующим кодированием. В соответствии с рассчитанными значениями ЦФ выполняются модифицированные операторы кроссинговера и мутации [9].

Для новых решений производится операция декодирования и расчета оценок. Данные оценки являются основными данными при работе оператора селекции на основе колеса рулетки [2, 19, 20]. Выбор данного типа селекции обусловлен тем фактом, что в конечную выборку могут попасть неэффективные решения. Данные неэффективные решения благоприятно сказываются на общем генотипе популяции, не позволяя алгоритму попасть в локальный оптимум. После этого процесс продолжается итерационно по достижению заданного количества итераций.

На последнем шаге производится выбор лучшего решения по результатам работы всего генетического поиска в целом. Лучшее решение декодируется и предоставляется ЛПР в виде стандартизированного описания алгоритма оптимизации. Результат может быть изменен ЛПР или принят в исходном виде.

**5. Экспериментальные исследования.** Серия экспериментальных исследований были проведены на основе алгоритма размещения фрагментов схемы СБИС при фиксированных значениях параметров гибридного поиска и методов, включенных в его состав. Размер популяции пчелиного и генетического алгоритмов  $|P_i| = 50$ . Для пчелиного алгоритма количество итераций  $I_b = 50$ , количество агентов  $A_b = 500$ . Для генетического алгоритма количество итераций  $I_g = 100$ , вероятность мутации  $P_g = 0,2$ .

Результаты определения затрат процессорного времени и объема памяти вычислительной системы при выполнении алгоритма приведены на рис. 4 и 5.

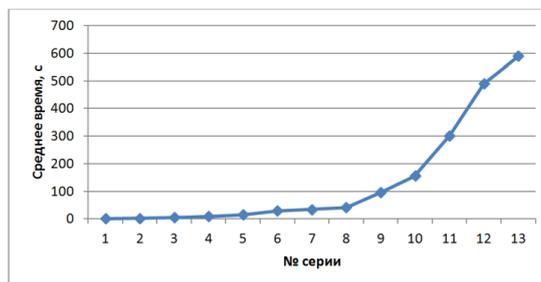


Рис. 4. Время выполнения биоинспирированного алгоритма размещения

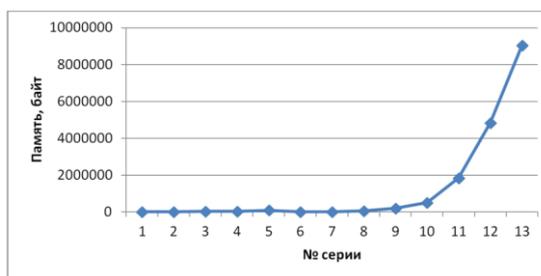


Рис. 5. Затраты памяти вычислительной системы

Временная сложность алгоритма составила  $O(n^2)$ , где  $n$  – число входных данных.

Основным преимуществом разработанного алгоритма является снижение вероятности попадания в локальный оптимум, а за счет распараллеливания уменьшается время.

**Заключение.** В данной работе описаны основные положения теории биоинспирированного поиска, а также выделены фундаментальные механизмы создания алгоритмов, основанных на моделировании биологических систем. Разработана новая подсистема генерации новых поисковых механизмов. Выделены основные компоненты подсистемы и разработана общая стандартизированная структура данных, основанная на XML-описании. Для эффективного управления информацией о гибридных поисковых механизмах разработана новая структура данных, основанная на XML описании. Представлены примеры стандартизированного описания. Для генерации новых иерархических поисковых процедур был разработан модифицированный генетический алгоритм, Авторами были интегрированы модифицированные алгоритмы кодирования и декодирования решений, а также модифицированные генетические операторы кроссинговера, позволяющие сократить время выполнения алгоритма в целом за счет генерации только валидных решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
2. Бельков В.Н., Ланишаков В.Л. Автоматизированное проектирование технических систем: учеб. пособие. – М.: Изд-во "Академия естествознания", 2009. – 143 с.
3. Zaporozhets D., Zaruba D.V., Kureichik V.V. Hybrid bionic algorithms for solving problems of parametric optimization // World Applied Sciences Journal. – 2013. – No. 23 (8). – P. 1032-1036.
4. Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю. Биоинспирированный алгоритм компоновки блоков ЭВА на основе модифицированной раскраски графа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (165). – С. 6-14.
5. Клаг У., Каммингс М. Основы генетики. – М.: Техносфера, 2007. – 896 с.

6. Спецификация языка описания схем XML (XML Schema Definition – XSD). <http://www.w3.org/2001XMLShcema>.
7. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
8. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.
9. *Курейчик В.М., Полковникова Н.А.* Многокритериальная оптимизация на основе эволюционных алгоритмов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 149-162.
10. *Курейчик В.М., Курейчик В.В.* Генетические алгоритмы в комбинаторно-логических задачах искусственного интеллекта // Известия ТРТУ. – 1999. – № 3 (13). – С. 126-128.
11. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Теория эволюционных вычислений. Научное издание / под ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
12. *Запорожец Д.Ю., Заруба Д.В., Лежебоков А.А.* Об одном способе кодирования решения для задачи размещения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 183-188.
13. *Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю.* Иерархический подход при размещении компонентов СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 75-84.
14. *Zaporozhets D.U., Zaruba, D.V., Kureichik, V.V.* Representation of solutions in genetic VLSI placement algorithms, IEEE East-West Design & Test Symposium – (EWDTS'2014) Kiev, Ukraine, 2014. – P. 1-4.
15. *Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю.* Алгоритм параметрической оптимизации на основе модели поведения роя светлячков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 6 (167). – С. 6-15.
16. *Kureichik, V.V., Kureichik, V.V. Jr., Zaruba, D.V.* Partitioning of ECE schemes components based on modified graph coloring algorithm. IEEE.
17. *Alpert C.J., Dinesh P.M., Sachin S.S.* Handbook of Algorithms for Physical design Automation, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, USA, 2009. East-West Design & Test Symposium – (EWDTS'2014) Kiev, Ukraine, 2014. – P. 1-4.
18. *Запорожец Д.Ю., Кудаев А.Ю., Лежебоков А.А.* Многоуровневый алгоритм решения задачи параметрической оптимизации на основе биоинспирированных эвристик // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 4 (54). – С. 21-28.
19. *Rastrigin L.A.* Random Search in Evolutionary Computations // Proceedings 1<sup>st</sup> International conf., Evolutionary Computation and Its Application, EvCA '96. – Moscow, 1996. – P. 135-143.
20. *Кулиев Э.В., Лежебоков А.А., Дуккардт А.Н.* Подход к исследованию окрестностей в роевых алгоритмах для решения оптимизационных задач // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 15-26.

#### REFERENCES

1. *Karpenko A.P.* Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a training manual]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 446 p.
2. *Bel'kov V.N., Lanshakov V.L.* Avtomatizirovannoe proektirovanie tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie [Automated design of technical systems: textbook]. Moscow: Izd-vo "Akademiya estestvoznaniya", 2009, 143 p.
3. *Zaporozhets D., Zaruba D.V., Kureichik V.V.* Hybrid bionic algorithms for solving problems of parametric optimization, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 23 (8), pp. 1032-1036.
4. *Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu.* Bioinspirirovannyy algoritim komponovki blokov EVA na osnove modifitsirovannoy raskraski grafa [Bioinspired approach to partitioning of ece schemes components problem based on the modified graph coloring], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4 (165), pp. 6-14.
5. *Klag U., Kammings M.* Osnovy genetiki [The basics of genetics]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 896 p.
6. Spetsifikatsiya yazyka opisaniya skhem XML (XML Schema Definition – XSD) [Specification description language XML schema (XML Schema Definition – XSD)]. Available at: <http://www.w3.org/2001XMLShcema>.
7. *Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.

8. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. Bioinspirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 384 p.
9. Kureychik V.M., Polkovnikova N.A. Mnogokriterial'naya optimizatsiya na osnove evolyutsionnykh algoritmov [Multiobjective optimization on the base of evolutionary algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Science], 2015, No. 2 (163), pp. 149-162.
10. Kureychik V.M., Kureychik V.V. Geneticheskie algoritmy v kombinatorno-logicheskikh zadachakh iskusstvennogo intellekta [Genetic algorithms in combinatorial-logical problems of the artificial intelligence], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 1999, No. 3 (13), pp. 126-128.
11. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy. Nauchnoe izdanie [The theory of evolutionary computing. Scientific publication], under ed. V.M. Kureychika. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
12. Zaporozhets D.Yu., Zaruba D.V., Lezhebokov A.A. Ob odnom sposobe kodirovaniya resheniya dlya zadachi razmeshcheniya [A method of coding solutions for solving problems placement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Science], 2012, No. 11 (136), pp. 183-188.
13. Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu. Ierarkhicheskiy podkhod pri razmeshchenii komponentov SBIS [Hierarchical approach for VLSI components placement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Science], 2014, No. 7 (156), pp. 75-84.
14. Zaporozhets D.U., Zaruba, D.V., Kureichik, V.V. Representation of solutions in genetic VLSI placement algorithms, IEEE East-West Design & Test Symposium – (EWDTS'2014) Kiev, Ukraine, 2014, pp. 1-4.
15. Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu. Algoritm parametriceskoy optimizatsii na osnove modeli povedeniya roya svetlyachkov [Parametric optimization algorithm based on the model of glowworm swarm behavior], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Science], 2015, № 6 (167), pp. 6-15.
16. Kureichik, V.V., Kureichik, V.V. Jr., Zaruba, D.V. Partitioning of ECE schemes components based on modified graph coloring algorithm. IEEE.
17. Alpert C.J., Dinesh P.M., Sachin S.S. Handbook of Algorithms for Physical design Automation, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, USA, 2009. East-West Design & Test Symposium – (EWDTS'2014) Kiev, Ukraine, 2014, pp. 1-4.
18. Zaporozhets D.Yu., Kudaev A.Yu., Lezhebokov A.A. Mnogourovnevyy algoritm resheniya zadachi parametriceskoy optimizatsii na osnove bioinspirovannykh evristik [A multilevel algorithm for solving the problem of parametric optimization based on bio-inspired heuristics], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya of Kabardino-Balkar scientific centre of the RAS], 2013, No. 4 (54), pp. 21-28.
19. Rastrigin L.A. Random Search in Evolutionary Computations, *Proceedings 1<sup>st</sup> International conf., Evolutionary Computation and Its Application, EvCA '96*. Moscow, 1996, pp. 135-143.
20. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A., Dukhardt A.N. Podkhod k issledovaniyu okrestnostey v roevykh algoritmakh dlya resheniya optimizatsionnykh zadach [Neural network technologies, fuzzy clustering and genetic algorithms in expert system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Science], 2014, No. 7 (156), pp. 15-26.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Заруба Дарья Викторовна** – Южный федеральный университет; e-mail: daria.zaruba@gmail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Запорожец Дмитрий Юрьевич** – e-mail: elpilasgsm@gmail.com; кафедра систем автоматизированного проектирования; ассистент.

**Zaruba Daria Viktorovna** – Southern Federal University; e-mail: daria.zaruba@gmail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; postgraduate student.

**Zaporozhets Dmitri Yurievich** – e-mail: elpilasgsm@gmail.com; the department of computer aided design; teaching assistant.

УДК 681.3

Ю.О. Чернышев, Н.Н. Венцов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ  
ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ИММУННЫМИ МЕТОДАМИ\***

*Предложенное представление процесса решения нечетко заданной оптимизационной задачи позволяет дополнить возможности саморегулирования известных эволюционных стратегий поиска решений использованием метода отрицательного отбора. Отличительной особенностью предложенной модели решения нечеткой оптимизационной задачи с помощью методов искусственных иммунных систем является процедура интеллектуальной генерации нечетких декодеров на основе анализа предметной области. Предложенный алгоритм реализации иммунного ответа базируется на методе альтернативной адаптации, позволяющем осуществлять интеллектуальный выбор из множества допустимых стратегий поиска элементами метода отрицательного отбора. Данный симбиоз позволяет оценивать решения не только с точки зрения оптимальности, но и в контексте близости анализируемого промежуточного результата к области запрещенных решений. Использование нечетких оценок состояния вычислительного процесса совместно с адаптивными методами принятия решений позволяет регулировать не только вариативную, но и инерционную составляющую стратегии поиска. Вариативная составляющая определяет способы оценки полученных результатов и может задаваться на естественном языке расплывчатыми условиями такими как «очень близко к L», «близко к L», «слегка близко к L» и т.д. Инерционная составляющая определяет степень динамичности реакции поисковой процедуры на нечеткое соответствие расплывчатым условиям.*

*Нечеткие системы; адаптация; импликация; интеллектуальные методы.*

Yu.O. Chernyshev, N.N. Ventsov

**USING FUZZY RESTRICTIONS WHEN SOLVING OPTIMIZATION  
PROBLEMS IMMUNE METHODS**

*The proposed representation of the process of decision not clearly specified optimization problem allows to extend the functionality of self-regulation known evolutionary search strategies of solutions using the method of negative selection. A distinctive feature of the proposed model solutions fuzzy optimization problem using the methods of artificial immune systems is the procedure for generating intellectual fuzzy decoders based on an analysis of the domain. The proposed algorithm implementation of the immune response is based on the method of alternative adaptation allows the intelligent selection of the set of admissible strategies. Scientific novelty of the proposed approach is to supplement evolutionary search strategy elements by negative selection. This symbiosis allows to evaluate not only the solutions in terms of optimality, but in the context of proximity to the analyte intermediate result proscribed solutions. Using fuzzy assessments of the computational process in conjunction with adaptive methods of decision-making allows you to adjust not only biodiversity, but also the inertial component of the search strategy. The variable component defines methods for assessing the results and can be specified in natural language vague terms such as "very close to L", «close to L», «a little close to the L», etc. The inertial component determines the degree of dynamic response of search procedures on strict conformity vague terms.*

*Fuzzy systems; adaptation; implication; intellectual methods.*

**Введение.** Решение широкого класса оптимизационных задач требует итеративного пересмотра полученных ранее результатов. К таким задачам можно отнести проектирование СБИС, отличительной чертой которых является большая об-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты: № 15-01-05129, № 16-01-00390, № 16-01-00391).

ласть поиска, нелинейность критериев оценки решений, большое количество переменных по которым необходимо оптимизировать и оценивать корректность решений. По причине большой области поиска (количество элементов в современных СБИС измеряется миллионами) и существенному количеству ограничений (необходимо учесть во многом противоречивые факторы, связанные с компактностью, надежностью, экономичностью проектируемых изделий), невозможно спроектировать всю схему, удовлетворяющую всем ограничениям за одну итерацию алгоритма. На каждой итерации решается, как правило, только одна задача, например, на первой итерации – компактного размещения элементов, на второй – электромагнитной совместимости, на третьей – тепловой совместимости, на четвертой – снижение стоимости изделия, на пятой – верификация. На текущей итерации поиск решения происходит с учетом значений переменных и ограничений, определенных на предыдущих итерациях [1–3].

**Постановка задачи.** Особенностью итеративного подхода является пересмотр полученных ранее решений, удовлетворяющих условиям значимым на предыдущей итерации, с целью получения решений, удовлетворяющих дополнительным, вводимым на данной итерации ограничениям. Промежуточное решение задачи оптимизации это набор значений заданных переменных, соответственно модификация решения – изменение значений данных переменных. Если значения переменных, описывающих некоторое решение, находится на границе области допустимых решений, то это может привести к тому, что на последующих итерациях будет проблематично получить из данного решения, удовлетворяющего текущим ограничениям, решение, соответствующее как текущим, так и дополнительным ограничениям. Таким образом, решение, соответствующее ограничениям, предъявляемым на начальных итерациях, может не соответствовать требованиям, предъявляемым на завершающих итерациях, и из него не возможно будет получить, применяя локальные изменения решения соответствующие требованиям предъявляемым на финальных итерациях. Данная проблема может привести к необходимости повторного выполнения всех итераций алгоритма. Поэтому она актуальна для многокритериальных задач оптимизации с большим числом ограничений. В связи, с чем в качестве дополнительных условий, характеризующих решения, можно использовать меру близости решения к области запрещенных значений.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что на этапе поиска решения оптимизационной задачи важно так организовать работу алгоритма, чтобы избежать областей близких ко множествам запрещенных решений. Можно предположить, что многие задачи, решаемые итеративными методами, условия которых заданы количественными характеристиками, по своей сути являются расплывчатыми.

Форрест и др. предложили механизм отрицательного отбора, основанный на распознавании своего и чужого. Данный подход моделирует поведение иммунных систем, он основан на использовании декодеров, описывающих чужеродные состояния системы. Контролируемые параметры сопоставляются с декодерами и, если установлено совпадение, то считается, что параметр принял запрещенное значение [4–6].

**Предлагаемый подход.** Особенностью итерационных алгоритмов является чередование процессов модификации и анализа текущих решений. Анализ решений, как правило, сводится к четкому делению особей на перспективные/вырождающиеся, корректные/ошибочные, лучшие/худшие. Предложено дополнение известных итерационных моделей поиска методом отрицательного отбора – одним из инструментов искусственных иммунных систем. Использование отрицательного отбора на основе нечетких декодеров позволило избавиться от бинарной количественной классификации и перейти к расплывчатым и качественным оцен-

кам. Механизм отрицательного отбора использовался для более детализированного анализа значений переменных, влияние которых может быть существенным на последующих этапах проектирования, изготовления и эксплуатации изделия.

Основными этапами решения задачи (рис. 1) являются: анализ предметной области, генерация нечетких детекторов, генерация особей, отрицательный отбор, модификация особей. Для случая решения задачи размещения элементов СБИС характеристикой особи может являться длина полупериметра  $L$  прямоугольника, описывающего элементы, расположенные в соответствии с решением, которое кодирует данная особь. Величина  $L$  может быть использована как для сопоставления особей, так и для задания множеств разрешенных и запрещенных решений. Рассматриваются вопросы представления запрещенных областей, оценок соответствия особей заданным областям, а также возможные варианты влияния на вычислительный процесс результатов анализа положения особи в пространстве решений.

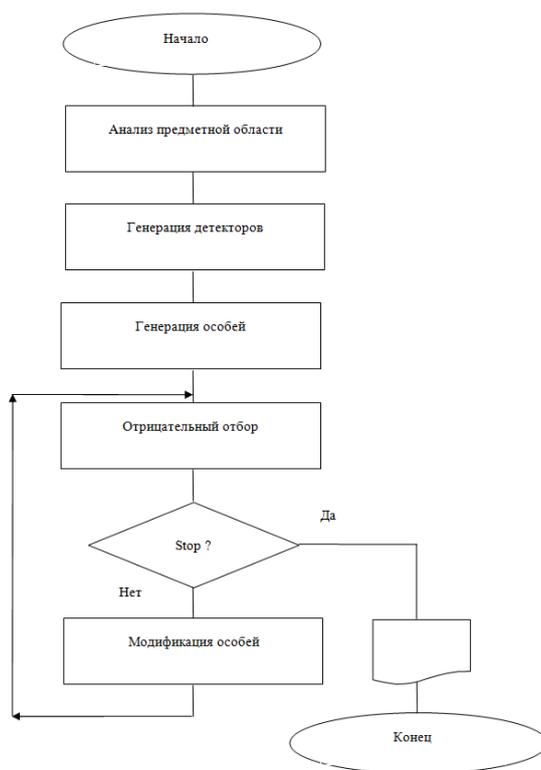


Рис. 1. Структурная схема алгоритма решения нечеткой оптимизационной задачи на основе методов искусственных иммунных систем

Одним из важнейших этапов поиска решений является построение подмножества альтернатив [7], описывающих например, критерии оценки полученных решений. В случае, если формирование потенциально целесообразных альтернатив осуществляется экспертом, необходимо обеспечить быстрое преобразование предположений эксперта в параметры задачи оптимизации. Диалог эксперт – ЭВМ наиболее эффективен, если он происходит в режиме реального времени [8]. В качестве аппарата для моделирования человеческих рассуждений и объяснения приёмов принятия решений в настоящее время активно используются методы нечёткой логики [9–13].

На основе анализа предметной области (рис. 1) необходимо сформировать описание множества точек, находящихся вблизи от множества запрещенных решений. Математическое описание данных точек позволяет сгенерировать детекторы, описывающие критически близкие ко множеству запрещенных решений области [4, 5, 14–16].

Например, предположим, что длина полупериметра, описывающего фрагмент проектируемого изделия, должна быть не более 0,7 nm (нанометров). В соответствии с этим условием, нечеткий декодер должен описывать принадлежность длины полупериметра к указанной запрещенной области.

Вначале определим способ оценки близости некоторого значения величине 0,7 nm. Для этого зададим функцию  $\mu_1(L)$ , описывающую степень близости числовой величины к 0,7 nm [15–17]. На рис. 2 представлен возможный график такой функции  $\mu_1(L)$ , описывающей принадлежность длины полупериметра  $L$  к нечеткому условию «близко к 0,7 nm».

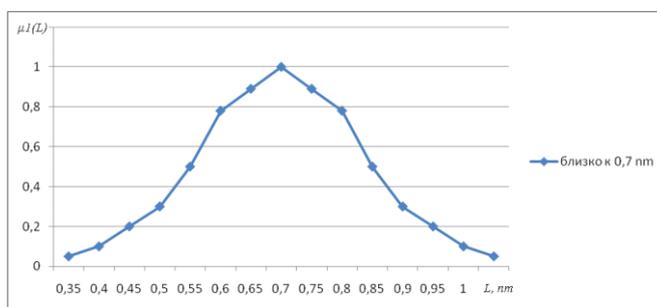


Рис. 2. График функции зависимости принадлежности к условию «близко к 0,7 нм» от длины полупериметра

Значение графика функции, представленного рис. 2, характеризует удаленность числа  $L$  от числа 0,7. Для числа  $L \in (0,35; 0,7)$ , чем меньше значение  $\mu_1(L)$ , тем меньше число  $L$  числа 0,7. Для числа  $L \in (0,7; 1,05)$ , чем меньше значение  $\mu_1(L)$ , тем больше число  $L$  числа 0,7. Таким образом, на основе функции  $\mu_1(L)$ , описывающей соответствие нечеткому условию «близко к 0,7 nm», можно построить функцию  $\mu_2(L)$ , описывающую соответствие нечеткому условию «меньше 0,7 nm». На отрезке  $(0,35; 0,7)$  функция  $\mu_2(L)$  строится на основе функции  $\mu_1(L)$  в соответствии с равенством  $\mu_2(L) = 1 - \mu_1(L)$ , на отрезке  $(0,7; 1,05)$ , функция определяется по формуле  $\mu_2(L) = 0$ . На рис. 3 приведен график функции  $\mu_2(L)$ .

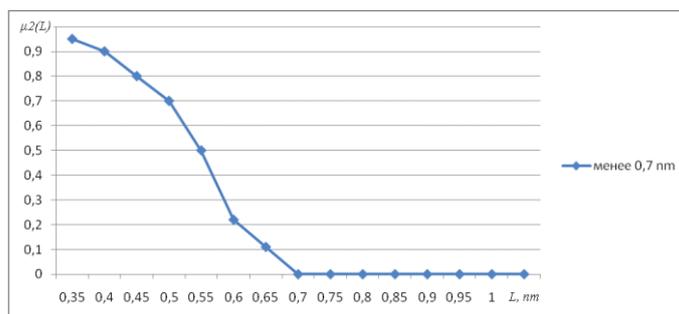


Рис. 3. График функции зависимости принадлежности к условию «меньше 0,7 нм» от длины полупериметра

Из данных, представленных на рис. 3 следует, что чем меньше значение аргумента  $L$  на отрезке  $(0,35;0,7)$ , тем ближе значение функции  $\mu_2(L)$  к единице.

В соответствии с концепцией искусственных иммунных систем декодер должен содержать описание критической, потенциально не допустимой ситуации. В рассматриваемом случае недопустимая ситуация, описывается условием  $L > 0,7$ , поэтому введем для декодера  $D$  функцию  $\mu_3(L) = 1 - \mu_2(L)$ , описывающую соответствие текущей длины  $L$  нежелательной ситуации, т.е. ситуации, когда  $L$  меньше  $0,7$ . Чем ближе значение функции к единице, тем ближе контролируемый параметр к области запрещенных решений. График функции  $\mu_3(L)$  приведен на рис. 4.

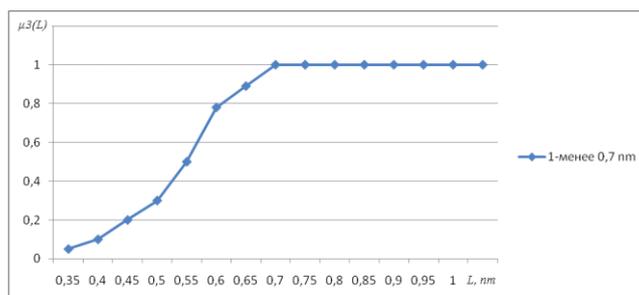


Рис. 4. График функции зависимости принадлежности к условию декодера от длины полупериметра

Операция отрицательного отбора будет состоять в вычислении  $\mu_3(L)$ , чем выше значение функции  $\mu_3(L)$ , тем более активной должна быть реакция иммунной системы.

По аналогии можно построить декодеры на основе нечеткого правила «очень близко к  $0,7$  nm» или «слегка близко к  $0,7$  nm». Подобная вариативность в оценках решений может понадобиться на этапе доводки изделия, когда вносятся точечные изменения [18–20].

Для реализации нечеткого правила «очень близко к  $0,7$  nm» можно определить функцию  $\mu_4(L) = \text{CON}(\mu_1(L)) = \mu_1(L) * \mu_1(L)$  [10, 12, 18]. График функции приведен на рис. 5.

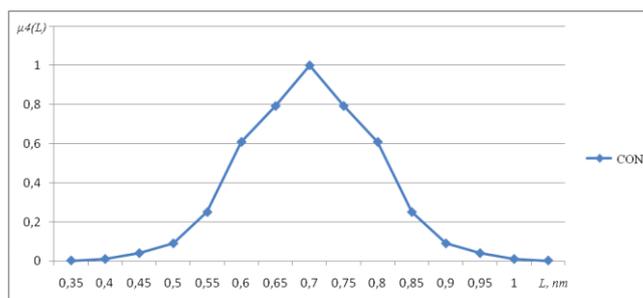


Рис. 5. График функции зависимости принадлежности к условию «очень близко к  $0,7$  nm» от длины полупериметра

На основе функции  $\text{CON}(\mu_1(L))$ , описывающей соответствие нечеткому условию «очень близко к  $0,7$  nm», можно построить функцию  $\mu_5(L)$ , описывающую соответствие нечеткому условию «очень меньше  $0,7$  nm». На отрезке  $(0,35;0,7)$  функция  $\mu_4(L)$ , строится на основе функции  $\text{CON}(\mu_1(L))$  по правилу  $\mu_5(L) = 1 - \mu_4(L)$ , на отрезке  $(0,7;1,05)$  функция, определяется по формуле  $\mu_5(L) = 0$ . На рис. 6 приведен график функции  $\mu_5(L)$ .

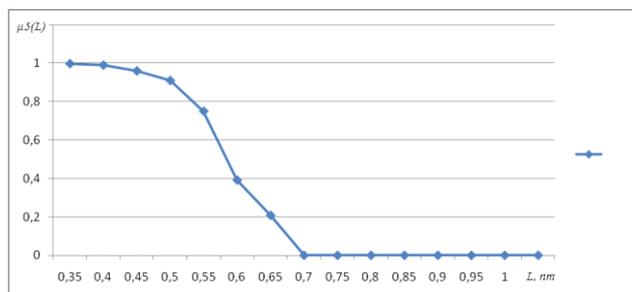


Рис. 6. График функции зависимости принадлежности к условию «очень меньше 0,7 нм» от длины полупериметра

Введем для декодера D функцию  $\mu_6(L)=1-\mu_5(L)$ , описывающую соответствие текущей длины L нежелательной ситуации, т.е. ситуации, когда L существенно меньше 0,7. Чем ближе значение функции  $\mu_6(L)$  к единице, тем ближе контролируемый параметр к области запрещенных решений. График функции  $\mu_6(L)$  приведен на рис. 7.

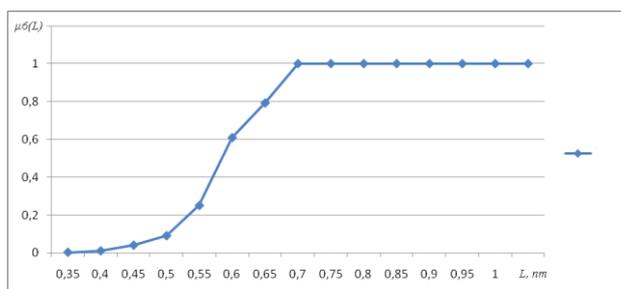


Рис. 7. График функции зависимости принадлежности к условию декодера от длины полупериметра

Иммунный ответ предлагается реализовывать на основе вычисления функции декодера, аргументами которой являются параметры оптимизационной задачи. Для рассматриваемого случая реакция может строиться на вычислении функции декодера  $\mu(L)$ . Чем ближе значение функции декодера к единице, тем более активной должна быть реакция. В качестве примера рассмотрим случай когда решение определяется при помощи генетического алгоритма [1, 21–24]. Процедура параллельно-последовательного генетического поиска состоит в распараллеливании исходной популяции на  $k$  подгрупп. К особям каждой подгруппы применяются генетические операторы мутации, кроссинговера и др. после чего происходит обмен особями. В данном случае, под иммунным ответом можно понимать изменение: числа подгрупп, числа особей в подгруппе, числа итераций.

При помощи автомата адаптации (АА) можно наделять алгоритм реализации иммунного ответа адаптивными свойствами [1, 21]. В простейшем случае это может быть АА, поддерживающий две альтернативы: А0 – не изменять параметры генетического алгоритма и А1 – изменять параметры генетического алгоритма. На рис. 8 приведена граф-схема переходов АА, реализующего данные альтернативы.

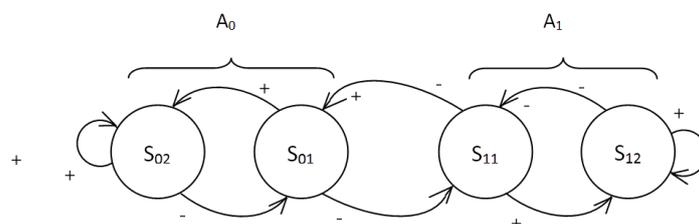


Рис. 8. Граф-схема переходов автомата адаптации

Введем переменную  $\mu_{\min}$ , описывающую минимально допустимое значение функции декодера  $\mu$ , соответствующее критической ситуации. Правила выработки управляющих сигналов АА (рис. 8), с использованием  $\mu_{\min}$  представлены в таблице.

Таблица

**Правила выработки управляющих сигналов**

Текущая альтернатива	Соотношение	Рекомендуемая альтернатива	Управляющий сигнал
$A_0$	$\mu < \mu_{\min}$	$A_0$	+
$A_0$	$\mu \geq \mu_{\min}$	$A_1$	-
$A_1$	$\mu < \mu_{\min}$	$A_0$	-
$A_1$	$\mu \geq \mu_{\min}$	$A_1$	+

В таблице столбец «Текущая альтернатива» определяет альтернативу реализованную на предшествующей итерации алгоритма, в столбце «Соотношение» указано неравенство на основании которого определяется рекомендуемая альтернатива, столбец «Рекомендуемая альтернатива» отражает информацию об альтернативе, которую целесообразно реализовать на следующей итерации, столбец «Управляющий сигнал» определяет направление перехода от текущей альтернативы к рекомендуемой. В процессе работы автомат адаптации определяет необходимость изменения параметров генетического алгоритма. В качестве способа реализации альтернативы  $A_1$  можно использовать изменение количества особей в популяции, количества итераций генетического алгоритма и т.д.

**Заключение.** Использование нечетких оценок состояния вычислительного процесса совместно с адаптивными методами принятия решений позволяет регулировать не только вариативную, но и инерционную составляющую стратегии поиска. Вариативная составляющая определяет способы оценки полученных результатов и может задаваться на естественном языке расплывчатыми условиями такими как «очень близко к  $L$ », «близко к  $L$ », «слегка близко к  $L$ » и т.д. Инерционная составляющая определяет степень динамичности реакции поисковой процедуры на нечеткое соответствие расплывчатым условиям.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: теория и практика: монография. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с.
2. Остроух Е.Н., Золотарева Л.И., Бычков А.А., Долгов В.В. Векторная оптимизация перерабатывающих процессов с учетом сырьевого дефицита // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 12-1. – С. 224-227.
3. Золотарева А.А. Один подход к решению интегральных уравнений начально-краевых задач для слоистых сред // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. – 1990. – № 6. – С. 30-35.

4. *Dasgupta D., Forrest S.* Novelty Detection in Time Series Data using Ideas from Immunology // Fifth International Conference on Intelligent Systems. Reno, Nevada: June, 1996.
5. *Calenbuhr V., Bersini Я., Varela F.J., Stewart J.* The impact of the structure of the connectivity matrix on the dynamics of a simple model for the immune network // Proc. 1st Copenhagen Symp. on Computer Simulation in Biology, Ecology and Medicine (Ed. E.Mosekilde). – 1993. – P. 41-45.
6. *Kennedy J.* The Particle Swarm: Social Adaptation of Knowledge // In Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. – 1997. – P. 303-308.
7. *Глушань В.М., Лаврик П.В.* Распределенные САПР. Архитектура и возможности. – Старый Оскол: ТНТ, 2104. – 188 с.
8. *Полковникова Н.А., Курейчик В.М.* Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1 (150). – С. 83-92.
9. *Zade L.A.* Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338.
10. *Курейчик В.М.* Особенности построения систем поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 92-98.
11. *Литвиненко В.А.* Адаптивные алгоритмы проектных операций САПР ЭВА // IS-IT 14: тр. Междунар. конгр. по интеллект. системам и информ. технологиям, п. Дивноморское, 2-9 сент. – М.: Физматлит, 2014. – Т. 1. – С. 113-119.
12. *Берштейн Л.С., Боженьюк А.В.* Анализ использования оператора импликации в нечетком правиле вывода по аналогии // Известия ТРТУ. – 2004. – № 3 (38). – С. 5-10.
13. *Мальшиев Н.Г., Берштейн Л.С., Боженьюк А.В.* Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
14. *Walter Banks, Gordon Hayward.* Fuzzy logic in embedded microcomputers and control systems. – Published by Byte Craft Limited, Waterloo Ontario Canada, 2001.
15. *Чернышев Ю.О., Венцов Н.Н., Мухтаров С.А.* К вопросу об интеллектуальной поддержке процесса доводки СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 63-69.
16. *Чернышев Ю.О., Венцов Н.Н., Мухтаров С.А.* Разработка алгоритма интеллектуальной поддержки улучшения промежуточных решений оптимизационных задач // Вестник ДГТУ. – 2012. – № 5 (56). – С. 68-76.
17. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит. 1986. – 321 с.
18. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
19. Прикладные пер. с япон. К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др. / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 386 с.
20. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
21. *Лебедев Б.К.* Адаптация в САПР: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999.
22. *Чернышев Ю.О., Полуян А.Ю., Венцов Н.Н., Панасенко П.А.* Адаптивный бионический алгоритм решения задачи о потоке данных минимальной стоимости // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. –URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3564](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3564).
23. *Курейчик В.М., Кулаков А.А.* Подсистема планирования сверхбольших интегральных схем трехмерной интеграции с учетом взаимного теплового влияния элементов // Программные продукты и системы. – 2014. – № 1. – С. 131-136.
24. *Курейчик В.М., Баринов С.В., Гладков Л.А.* Генетические алгоритмы разбиения схем с учетом временных задержек. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 350 с.

## REFERENCES

1. *Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika: monografiya [Search adaptation: theory and practice: monograph]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 272 p.
2. *Ostroukh E.N., Zolotareva L.I., Bychkov A.A., Dolgov V.V.* Vektornaya optimizatsiya pererabatyvayushchikh protsessov s uchetom syr'evogo defitsita [Vector optimization reworking of processes based on raw material shortages], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Researches], 2011, No. 12-1, pp. 224-227.

3. Zolotarev A.A. Odin podkhod k resheniyu integral'nykh uravneniy nachal'no-kraevykh zadach dlya sloistykh sred [One approach to the solution of integral equations of the initial-boundary value problems for layered media], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids], 1990, No. 6, pp. 30-35.
4. Dasgupta D., Forrest S. Novelty Detection in Time Series Data using Ideas from Immunology, *Fifth International Conference on Intelligent Systems. Reno, Nevada: June, 1996*.
5. Calenbuhr V., Bersini Я., Varela F.J., Stewart J. The impact of the structure of the connectivity matrix on the dynamics of a simple model for the immune network, *Proc. 1st Copenhagen Symp. on Computer Simulation in Biology, Ecology and Medicine (Ed. E.Mosekilde)*, 1993, pp. 41-45.
6. Kennedy J. The Particle Swarm: Social Adaptation of Knowledge, *In Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1997, pp. 303-308.
7. Glushan' V.M., Lavrik P.V. Raspredeleynnye SAPR. Arkhitektura i vozmozhnosti [Distributed CAD systems. Architecture and capabilities], Staryy Oskol: TNT, 2104, 188 p.
8. Polkovnikova N.A., Kureychik V.M. Razrabotka modeli ekspertnoy sistemy na osnove nechetkoy logiki [Development of an expert system model based on fuzzy logic], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 1 (150), pp. 83-92.
9. Zade L.A. Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, Vol. 8, pp. 338.
10. Kureychik V.M. Osobennosti postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Features of decision making support system design], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 92-98.
11. Litvinenko V.A. Adaptivnye algoritmy proektnykh operatsiy SAPR EVA [Adaptive algorithms project operations CAD EVA], *IS-IT'14: tr. Mezhdunar. kongr. po intellekt. sistemam i inform. tekhnologiyam, p. Divnomorskoe, 2-9 sent.* [IS-IT'14: proceedings of the International Congress on intellectual systems and information technologies, p. Divnomorskoe, 2-9 Sept.]. Moscow: Fizmatlit, 2014. Vol. 1, pp. 113-119.
12. Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Analiz ispol'zovaniya operatora implikatsii v nechetkom pravile vyvoda po analogii [Analysis of the use of the implication operator in fuzzy rule of inference by analogy], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2004, No. 3 (38), pp. 5-10.
13. Malyshev N.G., Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Nechetkie modeli dlya ekspertnykh sistem v SAPR [Fuzzy models for expert systems in CAD]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 136 p.
14. Walter Banks, Gordon Hayward. Fuzzy logic in embedded microcomputers and control systems. Published by Byte Craft Limited, Waterloo Ontario Canada, 2001.
15. Chernyshev Yu.O., Ventsov N.N., Mukhtarov S.A. K voprosu ob intellektual'noy podderzhke protsessa dovodki SBIS [To the question of intellectual support of process of finishing VLSI], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 63-69.
16. Chernyshev Yu.O., Ventsov N.N., Mukhtarov S.A. Razrabotka algoritma intellektual'noy podderzhki uluchsheniya promezhutochnykh resheniy optimizatsionnykh zadach [Development of the algorithm of intellectual support improve intermediate solutions of optimization problems], *Vestnik DGTU* [Vestnik of Don State Technical University], 2012, No. 5 (56), pp. 68-76.
17. Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta [Fuzzy sets in management models and artificial intelligence], under ed. D.A. Pospelova. Moscow: Nauka. Gl. red. Fiz.-mat. lit. 1986, 321 p.
18. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 165 p.
19. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]: translated from Japanese K. Asai, D. Watada, S. Ivai i dr., under ed. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno. Moscow: Mir, 1993, 386 p.
20. Kofman A. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv [Introduction to the theory of fuzzy sets]: translated from French. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 432 p.
21. Lebedev B.K. Adaptatsiya v SAPR: monografiya [Adaptation in CAD: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999.
22. Chernyshev Yu.O., Poluyan A.Yu., Ventsov N.N., Panasenko P.A. Adaptivnyy bionicheskiy algoritm resheniya zadachi o potoke dannykh minimal'noy stoimosti [Adaptive bionic algorithm for solving the problem of data flow minimum cost], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2016, No. 1. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3564](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3564).

23. *Kureychik V.M., Kulakov A.A.* Podsystema planirovaniya sverkhbol'shikh integral'nykh skhem trekhmernooy integratsii s uchetom vzaimnogo teplovogo vliyaniya elementov [The scheduling engine ultralarge integrated circuits three-dimensional integration taking into account the mutual thermal influence of elements], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2014, No. 1, pp. 131-136.
24. *Kureychik V.M., Barinov S.V., Gladkov L.A.* Geneticheskie algoritmy razbieniya skhem s uchetom vremennykh zaderzhek [Genetic algorithms partitioning schemes based on temporary delays]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2014, 350 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.К. Лебедев.

**Чернышев Юрий Олегович** – Донской государственный технический университет; e-mail: myvnn@list.ru; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: 88632738582; кафедра автоматизации производственных процессов; профессор.

**Венцов Николай Николаевич** – e-mail: vencov@list.ru; кафедра информационных технологий; доцент.

**Chernyshev Yuriy Olegovich** – Don State Technical University; e-mail: myvnn@list.ru; 1, Gagarin street, Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: +78632738582; the department of automation of productions; professor.

**Ventsov Nikolay Nikolaevich** – e-mail: vencov@list.ru; the department of information technologies; associate professor.

УДК 658.512.2.011.5

**Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова**

### **ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ\***

*Рассматривается новый подход к решению динамических транспортных задач. Показана актуальность и важность решения подобного рода задач для повышения эффективности перевозок и развития транспортной инфраструктуры. Отмечено, что особый интерес представляют некоторые классы задач маршрутизации автотранспорта, в частности транспортная задача с ограничением по времени. Выделены особенности статической и динамической транспортных задач. Приведено графическое представление динамической транспортной задачи. Выполнена математическая постановка задачи маршрутизации автотранспорта. Определена функция оценки качества получаемых решений. Разработана методика кодирования решений для использования их в генетическом алгоритме. Предложены новые модификации операторов кроссинговера и мутации, направленные на повышение разнообразия текущей популяции и преодоление локальных оптимумов. Описана последовательность выполнения операций и приведена структура разработанного алгоритма. Описана структура и принципы работы менеджера событий, который позволяет повысить эффективность работы алгоритма, за счет организации обработки вновь поступающих заявок. На основе проведенного анализа установлено, что для эффективного подобных задач необходима разработка новых методов, позволяющих осуществлять динамическое изменение параметров алгоритма и, при необходимости видоизменять структуру алгоритма. Приведен пример структуры вектора управляющего воздействия на параметры генетического алгоритма со стороны нечеткого логического контроллера. Также описана структура вектора входных параметров для нечеткого логического контроллера. Проведены серии вычислительных экспериментов для анализа и сравнения каче-*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-07-00829).

ства получаемых решений, а также определения лучших значений управляющих параметров алгоритма. На основании анализа сделаны выводы о достоинствах и недостатках предложенного алгоритма.

*Задачи маршрутизации автотранспорта; динамическая транспортная задача с ограничением по времени; эволюционные вычисления; гибридные интеллектуальные методы.*

**L.A. Gladkov, N.V. Gladkova**

### **HYBRID ALGORITHM FOR SOLVING VEHICLE ROUTING PROBLEMS WITH A TIME WINDOWS**

*The article discusses a new approach to the dynamic transportation problems. The urgency and importance of addressing such problems to increase the efficiency of traffic and transport infrastructure. It is noted that of particular interest are certain classes of vehicle routing problems, in particular transport task with a time limit. The features of static and dynamic transport problems. The graphic representation of the dynamic transportation problem. A mathematical formulation of the vehicle routing problem. We define the function evaluation of the quality of the solutions obtained. The method of coding solutions for use in the genetic algorithm. Proposed new modifications crossover and mutation operators, aimed at increasing the diversity of the current population and overcome local optima. Described sequence of operations, and shows the structure of the developed algorithm. The structure and principles of the event manager, which allows you to improve the efficiency of the algorithm, through the organization of the processing of incoming orders again. Based on the analysis found that the effectiveness of these tasks necessary to develop new methods that enable the dynamic change of algorithm parameters, and modify the structure of the algorithm if necessary. An example of the structure of the vector control action on the parameters of the genetic algorithm by the fuzzy logic controller. the structure of the vector of the input parameters for the fuzzy logic controller is also described. We conducted a series of numerical experiments to analyze and compare the quality of the solutions, as well as to determine the best values of the control algorithm parameters. Conclusions based on the analysis of the advantages and disadvantages of the proposed algorithm*

*Vehicle routing problems; dynamic vehicle routing problem with time windows; evolutionary calculations; hybrid intellectual methods.*

**Введение.** Перевозка людей и грузов – это важная составляющая современной экономики. По статистике на долю транспортных перевозок в экономически развитых странах приходится порядка 10–15 % национальных расходов. Сокращение издержек на перевозку грузов дает огромный экономический эффект. Поэтому разработка новых алгоритмов, позволяющих повысить эффективность решения транспортных задач является актуальной и востребованной задачей.

Точные методы решения, позволяют решать задачи только с небольшим количеством клиентов (не более 50-ти). Для решения практических задач большой размерности отражающих существующие экономические реалии необходимо разрабатывать новые подходы, базирующиеся на использовании новейших достижений математики, компьютерных новых, информационных технологий. Одним из наиболее перспективных современных научных трендов является использование интегрированных подходов, лежащих на стыке различных наук. В частности, для решения сложных многокритериальных задач оптимизации с успехом используют различные методы вычислительного интеллекта, в том числе эволюционные методы поиска, нечеткие математические модели, методы обучения на основе нейросетевых моделей и т.д.

С практической точки зрения одной из наиболее интересных классов транспортных задач (или задач маршрутизации автотранспорта) являются задачи с ограничением по времени. Транспортные задачи подразделяются на статические и динамические. В статической транспортной задаче все параметры заданы изначально и не изменяются во время ее решения. В динамической транспортной зада-

че условия могут изменяться в процессе решения. Это свойство приобретает дополнительное значение в связи с развитием средств мобильной связи и навигации, дающих возможность отслеживать маршрут автомобиля и передавать указания в процессе движения. Поэтому задача разработки алгоритмов решения задач с ограничением по времени и с учетом динамики изменения запросов клиентов, является актуальной.

**Постановка задачи.** В нашем случае, под динамической транспортной задачей будем подразумевать задачу с возможностью изменения положения клиентов в процессе движения транспорта по маршруту [1–3]. Данную динамическую задачу можно представить как серию последовательных статических подзадач. При этом количество обслуживаемых запросов от клиентов задается заранее, также предусмотрена возможность появления запросов по ходу решения задачи. Каждая подзадача обладает своими уникальными начальными условиями и количеством клиентов, требующих обслуживания. Начальным условием является положение транспортного средства во время получения динамического запроса. Рассматриваемая динамическая транспортная задача может быть представлена в виде графа (рис. 1).

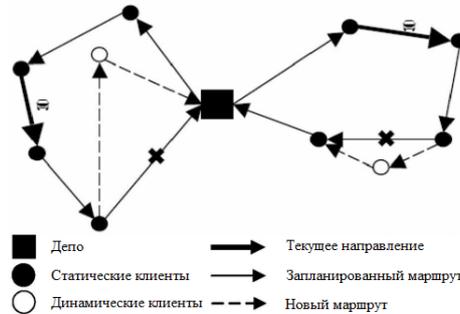


Рис. 1. Графическое представление динамической транспортной задачи

Задача маршрутизации автотранспорта с ограничением по времени (VRPTW) может быть представлена в виде графа  $G = (X, U)$ ,  $X = n + 1$ , где:  $n$  – множество вершин, равное числу клиентов (вершины  $1, 2, \dots, n$ ), а также исходное депо, откуда начинают и где заканчивают свой маршрут все автомобили (вершина  $n + 1$ );  $U$  – дуги, соединяющие вершины графа [4]. Основные цели: минимизировать общее количество задействованных транспортных средств и общее расстояние, покрытое всеми транспортными средствами [5, 6].

Тогда целевая функция рассматриваемой транспортной задачи может быть записана в следующем виде

$$F = \sum_{k \in V} \sum_{(i, j) \in U} c_{ij} x_{ij}^k \rightarrow \min$$

при соблюдении всех заданных ограничений [6]. В данном выражении используются следующие обозначения:

$c_{ij}$  – стоимость перевозки груза по маршруту  $(i, j)$ ;

$V$  – число автомобилей одного типа (грузоподъемности  $q$ ),  $k \in V$ ;

$x_{ij}^k$  – переменная, принимающая значения  $\{0, 1\}$  и характеризующая направление движения автомобиля:  $x_{ij}^k = 1$  – если автомобиль движется от клиента  $i$  к клиенту  $j$ ;  $x_{ij}^k = 0$  – если автомобиль движется в обратном направлении.

**Описание алгоритма.** Кодирование решений в разработанном гибридном алгоритме выполняется следующим образом. Предполагается, что количество транспортных средств совпадает с количеством маршрутов, тогда решение можно

представить в виде последовательности клиентов, которых поочередно обслуживает рассматриваемое транспортное средство. Маршрут должен начинаться и заканчиваться в депо (клиент 0).

В процессе формирования начальной популяции используется оператор инициализации. Все клиенты выбираются на основе вероятностных правил, что обеспечивает необходимое разнообразие решений в популяции [7–10].

В общем виде процедура формирования начальной популяции может быть описана следующим образом.

$P_1$

$O_{11}$	2	5	3	9	0
$O_{12}$	7	10	1	0	
$O_{13}$	4	8	6	0	

Рис. 2. Пример кодирования маршрута для 3 транспортных средств и 10 клиентов

1. Если все клиенты обслужены, то переход к пункту 5, в противном случае выбираем клиента  $k^*$  из числа еще не обслуженных.

2. Перебираем клиентов в уже существующем решении, чтобы вставить клиента  $k^*$  в текущий маршрут данного решения. При возможности такой вставки выбираем вставку с минимальным добавлением расстояния. При существовании двух вариантов вставки с одинаковым добавлением расстояния, выбираем вариант с меньшим простоем транспорта.

3. Если невозможно вставить нового клиента в уже существующий маршрут, то создаем новый маршрут, который будет включать клиента  $k^*$ .

4. Переходим к пункту 1.

5. Маршрут построен.

Оператор инициализации позволяет не только строить, но и дорабатывать решения, в которых доля клиентов уже обслужена.

В качестве операторов отбора используется комбинация стандартных вариантов: пропорциональный, равновероятный и элитный отбор.

В алгоритме используется модифицированный оператор кроссинговера. Поясним его работу на примере. Родители  $P_1$  и  $P_2$  выбираются из популяции  $P$ . В каждом родителе случайным образом выбирается 2 гена (маршрута) и удаляются из генома родителей. Оставшиеся гены образуют новое решение. Затем удаленные гены вставляются в это решение таким образом, чтобы минимизировать ЦФ. Если местоположение вставки не будет найдено, создается новый маршрут.

Например, из хромосом  $P_1$  и  $P_2$  случайным образом выбираются маршруты 3 и 1 соответственно (рис. 3).

$P_1$                        $P_2$

$O_{11}$	2	5	3	9	0
$O_{12}$	7	10	1	0	
$O_{13}$	4	8	6	0	

$O_{11}$	9	7	8	0	
$O_{12}$	6	3	2	5	0
$O_{13}$	1	4	10	0	

Рис. 3. Родительские хромосомы  $P_1$  и  $P_2$

Затем также случайным образом в этих маршрутах выбираются по 2 разрезающие точки (рис. 4).



Рис. 4. Выбор точек разреза

Клиенты, находящиеся между выбранными точками удаляются из всех маршрутов. В данном примере это клиенты 4, 8 и 7.

O <sub>11</sub>	2	5	3	9	0	O <sub>11</sub>	9	0	
O <sub>12</sub>	10	1	0	O <sub>12</sub>	6	3	2	5	0
O <sub>13</sub>	6	0	O <sub>13</sub>	1	10	0			

Рис. 5. Родители  $P_1$  и  $P_2$  после удаления клиентов

Затем удаленные клиенты вставляются в позиции, для которых целевая функция принимает минимальное значение (рис. 6).

C <sub>1</sub>						C <sub>2</sub>					
O <sub>11</sub>	2	5	3	9	0	O <sub>11</sub>	9	7	4	0	
O <sub>12</sub>	10	8	1	0	O <sub>12</sub>	6	3	2	5	0	
O <sub>13</sub>	6	7	4	0	O <sub>13</sub>	1	8	10	0		

Рис. 6. Решение, полученное после применения кроссинговера

Результат выполнения оператора кроссинговера показан на рис. 7.

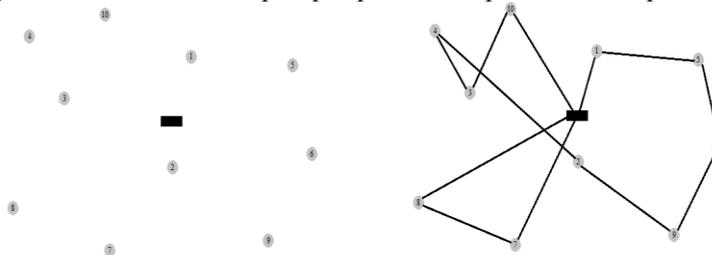


Рис. 7. Начальное расположение и результат выполнения оператора кроссинговера

В алгоритме также предложен модифицированный оператор мутации. В данном случае используется мутация обмена, когда случайным образом выбираются две позиции и меняются местами (рис. 8).

O <sub>11</sub>	3	2	10	0	→	O <sub>11</sub>	3	2	10	0		
O <sub>12</sub>	4	8	6	5		0	O <sub>12</sub>	6	8	4	5	0
O <sub>13</sub>	9	7	1	0		O <sub>13</sub>	9	7	1	0		

Рис. 8. Пример работы оператора мутации

В общем виде последовательность выполнения операций можно описать следующим образом:

1. Задание параметров алгоритма.
2. Формирование начальной популяции решений размера  $N$ . Применение оператора инициализации  $N$  раз.
3. Расчет значения ЦФ для каждого решения в популяции.
4. Сортировка решений в порядке возрастания ЦФ.
5. Присваиваем переменной  $t$  значение 0.
6. Применение оператора селекции для выбора решения.
7. Выполнение генетических операторов
  - 7.1 Выполнение оператора кроссинговера с вероятностью  $P_k$ .

- 7.2 Выполнение оператора мутации (ОМ) к решениям, полученным после применения кроссинговера с вероятностью  $P_m$ .
  8. Перерасчет значений ЦФ для каждого решения.
  9. Определяем вид оператора отбора.
  10. Выполнение оператора редукции.
  11. Если прошло 20 итераций, то изменяем координаты одной вершины, иначе переход к следующему пункту.
  12. Если  $t$  меньше  $T$ , то заменяем исходную популяцию новой, увеличиваем значение переменной  $t = t + 1$ , возврат к п. 5; в противном случае, переход к п. 12.
  12. Если показатели эффективности эволюции неудовлетворительные и требуется регулировка параметров, то выполняется динамическая подстройка параметров с использованием НЛК [11–17].
  13. Если пройдено заданное число поколений или достигнут другой критерий останова, то переход к п. 14, в противном случае, возврат к п. 2.
  14. Завершение работы алгоритма.
- Обобщенная схема алгоритма представлена на рис. 9.

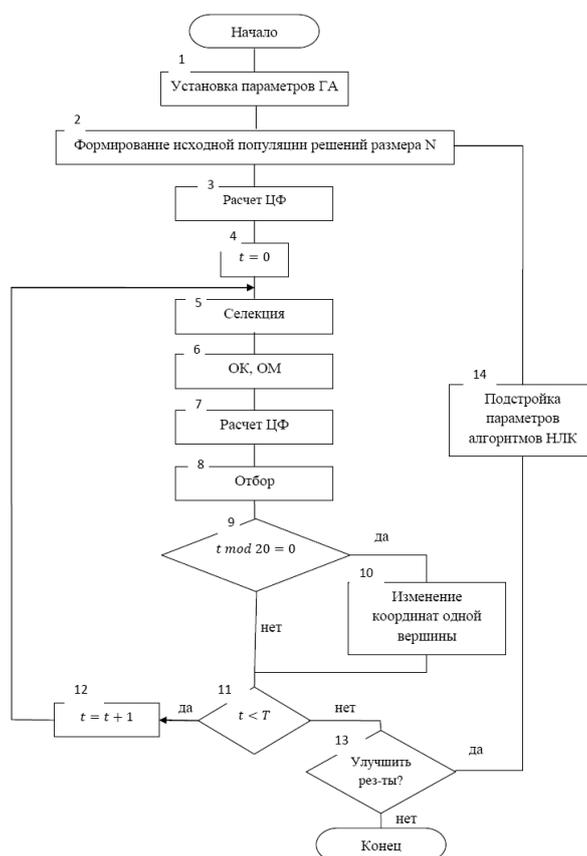


Рис. 9. Схема работы алгоритма

Для повышения эффективности обработки динамических запросов клиентов, в разработанный гибридный алгоритм был добавлен так называемый менеджер событий. Цель использования менеджера событий состоит в том, чтобы связать

воедино временные интервалы, отведенные на решение каждой статической задачи, и обеспечить последовательное обслуживание новых заявок сразу после их поступления.

Задача заключается в разделении рабочего дня на  $n_{ts}$  (*time slices*) отрезков времени, каждый из которых равен величине  $\frac{T}{n_{ts}}$ , где  $T$  – длина рабочего дня.

В процессе принятия решения мы откладываем принятие новых заявок до конца этого отрезка времени. Благодаря этому у нас есть возможность оптимизировать новые входные заказы за дискретное число шагов (рис. 10).

Каждый отрезок времени представляет собой статическую задачу, в которой транспортное средство должно обслужить всех известных клиентов. Менеджер событий выполняется в последовательности решения алгоритма на этом отрезке времени. Решение об обслуживании новой заявки может быть принято в рамках расширенного времени обслуживания –  $t_{ac}$  (*advanced commitment time*), что позволяет водителю реагировать на новые заказы еще до его обработки.



Рис. 10. Разделение рабочего дня

Первая статическая задача, назначенная на первый отрезок времени, состоит из всех заказов, оставшихся от предыдущего рабочего дня. Время отключения  $t_{co}$  (*time cut-off*) – параметр, управляющий временем, в течение которого могут быть получены новые заказы, но при этом останутся не обслуженные клиенты. Все заказы, полученные после времени  $t_{co}$ , интерпретируются как клиенты, которые не были обслужены за текущий день и переносятся на следующий рабочий день.

Следующая статическая задача рассматривает все заказы, полученные в течение следующего отрезка времени, а также еще не обслуженные водителями заказы. В нашем представлении, каждое транспортное средство  $k$  начинает свой маршрут от места последнего обслуженного им клиента. Время отсчета начинается с момента завершения обслуживания предыдущего клиента. А объем груза определяется объемом, освободившимся в результате обслуживания предыдущих  $k$  клиентов.

В конце каждого отрезка времени, выбираются наилучшее решение и заказы

со временем обработки  $\frac{T}{n_{ts}} + t_{ac}$ , обслуживаются соответствующими транспортными средствами. Транспортное средство, которое доставило весь свой груз, возвращается в депо.

Транспортное средство, которое доставило весь свой груз, возвращается в депо.

Задача нечеткого логического контроллера в данном алгоритме заключается в том, чтобы, используя получаемые значения оценочных величин, соответствующим образом динамически изменять параметры генетического алгоритма, а также при необходимости принимать решение о выполнении дополнительных генетических операторов для того, чтобы избежать преждевременной сходимости [18].

Вектор управления, оказывающий воздействие на динамику эволюции решений, описывается следующим образом:

$$U^t = (\Delta p_c^t, \Delta p_m^t, \delta^t),$$

где  $\Delta p_c^t$  и  $\Delta p_m^t$  – изменение значений вероятности выполнения операторов кроссинговера и мутации, а  $\delta^t$  – параметр определяющий момент переключения эволюции с одной фазы на другую [19, 20].

В состав параметров поступающих на вход НЛК входят оценка эффективности эволюции на предыдущем шаге  $\gamma$ , текущее время эволюции  $t$ , промежуток времени  $\Delta t$  в течении которого не наблюдалось улучшения значений целевой функции:  $X_t = (\gamma t - 1, t, \Delta t)$ .

**Вычислительные эксперименты.** Для реализации предложенного гибридного алгоритма решения динамической транспортной задачи была разработана программа на языке высокого уровня C++. Программа предназначена для работы с операционными системами Windows XP, 7, 8.

Для определения эффективности предложенного алгоритма проводились вычислительные эксперименты, в ходе которых выполнялось сравнение результатов, показываемых данным алгоритмом с результатами известных тестовых задач (бенчмарков).

Задача первого этапа тестирования состояла в подборе параметров для начальных задач. Для этого программа запускалась с различными вариантами начальных значений. Результаты исследования зависимости числа поколений от вероятностей операторов кроссинговера и мутации, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Определение оптимальных значений ОМ и ОК**

Вероятность ОК	Вероятность ОМ			
	20 %	40 %	60 %	80 %
20 %	4366	4287	4210	4315
40 %	4241	4326	4163	4235
60 %	4349	4301	4256	4154
80 %	4341	4235	4215	4193

Также проводились исследования зависимости времени работы алгоритма от числа итераций и размера популяции (табл. 2).

Таблица 2

**Зависимость времени работы алгоритма от числа итераций**

Количество итераций	Размер популяции	Время работы алгоритма
10	50	0.006
10	100	0.01
200	200	0.514
300	300	1.86
300	400	2.83
300	2000	15.63
300	6000	54.01
300	8000	80.91

Исходя из приведенной таблицы, можно сказать, что лучшие результаты достигаются при 300 итерациях и популяции размером от 300 до 400 решений.

Поскольку исследуемая задача является динамической, то в моменты изменения внешних условий на графике ЦФ появляются изгибы (рис. 11).

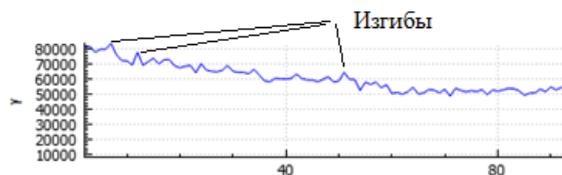


Рис. 11. График ЦФ

Это связано с тем, что при поступлении новых заявок, ЦФ существующих решений ухудшаются, т.к. прежний маршрут не учитывал новых клиентов. Через некоторое время после этого алгоритм адаптируется к изменившимся условиям и средняя ЦФ снова уменьшается.

Для оценки эффективности разработанного гибридного алгоритма, был проведен сравнительный анализ результатов, показанный с использованием НЛК и без него (рис. 12)

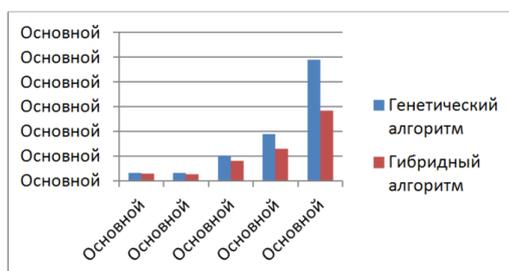


Рис. 12. Сравнение эффективности алгоритмов

Также была проведена оценка временной сложности алгоритма и построена зависимость времени работы алгоритма от числа вершин (рис. 13).

**Выводы.** Анализ полученных результатов известных алгоритмов позволяет сделать вывод о том, что оптимальные вероятности выполнения операторов кроссинговера и мутации 0.8 и 0.6, соответственно. Размер популяции 300–400 решений. Число итераций – 300. Как видно из графиков на работу гибридного алгоритма оказывает существенное процесс формирования начальной популяции.

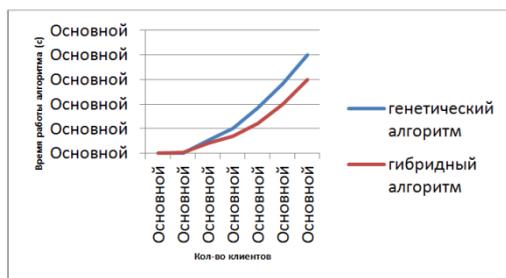


Рис. 13. График зависимости времени работы от числа вершин

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кажаров А.А., Курейчик В.М. Классификация и критерии оптимизации задачи маршрутизации автотранспорта // Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". Т. 2. – М.: Физматлит, 2013. – С. 879-886.

2. *Емельянова Т.С.* Эвристические и метаэвристические методы решения динамической транспортной задачи // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2007. – № 3 (31). – С. 33-43.
3. *Емельянова Т.С.* Анализ методов решения нелинейных транспортных задач. // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2007. – № 1 (29). – С. 38-49.
4. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В.* Решение динамических транспортных задач на основе гибридных интеллектуальных методов и моделей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 102-107.
5. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В.* Особенности и новые подходы к решению динамических транспортных задач с ограничением по времени // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 178-187.
6. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В.* Гибридный алгоритм решения транспортных задач с ограничением по времени // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 6 (167). – С. 180-191.
7. *Емельянова Т.С.* Генетический алгоритм решения транспортной задачи с ограничением по времени // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2007. – № 4 (32). – С. 43-59.
8. *Курейчик В.М., Емельянова Т.С.* Решение транспортных задач с использованием комбинированного генетического алгоритма // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008: Труды конференции. Т. 1. – М.: Физматлит, 2008. – С. 158-164.
9. *Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 365 с.
10. *Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.
11. *Herrera F., Lozano M.* Fuzzy Genetic Algorithms: Issues and Models. Technical Report DECSAI-98116, Department of Computer Science and A.I., University of Granada, 1999. – 25 p.
12. *Herrera F., Lozano M.* Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions // Soft Computing 7 (2003), Springer-Verlag, 2003. – P. 545-562.
13. *Lee M.A., Takagi H.* Dynamic Control of Genetic Algorithms using Fuzzy Logic Techniques // Proceeding of 5th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA'93), Urbana-Champaign, IL, July 17-21, 1993. – P. 76-83.
14. *Батыршин И.З., Недосекин А.О. и др.* Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / под ред. Н.Г. Ярушкиной. – М.: Физматлит, 2007. – 208 с.
15. *Ярушкина Н.Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
16. *Hongbo Liu, Zhanguo Xu, Ajith Abraham* Hybrid Fuzzy-Genetic Algorithm Approach for Crew Grouping // Proceedings of the Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2005), 8-10 September 2005, Wroclaw, Poland. IEEE Computer Society 2005. – P. 332-337.
17. *Гладков Л.А., Гладкова Н.В.* Особенности использования нечетких генетических алгоритмов для решения задач оптимизации и управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 4 (93). – С. 130-136.
18. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Основы теории эволюционных вычислений: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010.
19. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N.* Manufacturing Scheduling Problem Based on Fuzzy Genetic Algorithm // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014). Kiev, Ukraine, September 26 – 29, 2014. – P. 209-213.
20. *Gladkov L.A., Leiba S.N., Gladkova N.V., Legebokov A.A.* Parallel Genetic Algorithm Based on Fuzzy Logic Controller for Design Problems // Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC 2016), Vol. 1: Artificial Intelligence Perspectives in Intelligent Systems. – Springer International Publishing, Switzerland, 2016. – P. 147-157.

## REFERENCES

1. *Kazharov A.A., Kureychik V.M.* Klassifikatsiya i kriterii optimizatsii zadachi marshrutizatsii avtotransporta [Classification and criteria optimization problem of routing vehicles], *Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte"* Proceedings of the VII International scientific-practical conference "Integrated models and soft computing in artificial intelligence". Vol. 2. Moscow: Fizmatlit, 2013, pp. 879-886.
2. *Emel'yanova T.S.* Evristicheskie i metaevristicheskie metody resheniya dinamicheskoy transportnoy zadachi [Heuristic and metaheuristic methods for solving the dynamic transportation problem], *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektual'nye sistemy* [Advanced Information Technologies and Intelligent Systems], 2007, No. 3 (31), pp. 33-43.
3. *Emel'yanova T.S.* Analiz metodov resheniya nelineynykh transportnykh zadach [Analysis of methods for solving nonlinear transport problems], *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektual'nye sistemy* [Advanced Information Technologies and Intelligent Systems], 2007, No. 1 (29), pp. 38-49.
4. *Gladkov L.A., Gladkova N.V.* Reshenie dinamicheskikh transportnykh zadach na osnove gibridnykh intellektual'nykh metodov i modeley [The decision of dynamic vehicle routing problems on the basis of hybrid intellectual methods and models], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 102-107.
5. *Gladkov L.A., Gladkova N.V.* Osobennosti i novye podkhody k resheniyu dinamicheskikh transportnykh zadach s ogranicheniem po vremeni [Features and new approaches to the decision of dynamic vehicle routing problems with time windows], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 178-187.
6. *Gladkov L.A., Gladkova N.V.* Gibridnyy algoritm resheniya transportnykh zadach s ogranicheniem po vremeni [Hybrid algorithm for solving vehicle routing problems with a time windows], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 6 (167), pp. 180-191.
7. *Emel'yanova T.S.* Geneticheskii algoritm resheniya transportnoy zadachi s ogranicheniem po vremeni [Genetic algorithm for solving transportation problem with time limit], *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektual'nye sistemy* [Advanced Information Technologies and Intelligent Systems], 2007, No. 4 (32), pp. 43-59.
8. *Kureychik V.M., Emel'yanova T.S.* Reshenie transportnykh zadach s ispol'zovaniem kombinirovannogo geneticheskogo algoritma [The solution of transport problems using the combined genetic algorithm], *Odinnadtsataya natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2008: Trudy konferentsii* [Eleventh National conference on artificial intelligence with International participation KII-2008: Proceedings of the conference]. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit, 2008, pp. 158-164.
9. *Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V., Sorokoletov P.V.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 365 p.
10. *Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V., Sorokoletov P.V.* Bioinspirirovannye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 384 p.
11. *Herrera F., Lozano M.* Fuzzy Genetic Algorithms: Issues and Models. Technical Report DECSAI-98116, Department of Computer Science and A.I., University of Granada, 1999, 25 p.
12. *Herrera F., Lozano M.* Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions, *Soft Computing 7 (2003)*, Springer-Verlag, 2003, pp. 545-562.
13. *Lee M.A., Takagi H.* Dynamic Control of Genetic Algorithms using Fuzzy Logic Techniques, *Proceeding of 5th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA'93), Urbana-Champaign, IL, July 17-21, 1993*, pp. 76-83.
14. Nechetkie gibridnye sistemy. Teoriya i praktika [Fuzzy hybrid system. Theory and practice], under the ed. N.G. Yarushkinoy. Moscow: Fizmatlit, 2007, 208 p.
15. *Yarushkina N.G.* Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2004, 320 p.
16. *Hongbo Liu, Zhanguo Xu, Ajith Abraham* Hybrid Fuzzy-Genetic Algorithm Approach for Crew Grouping, *Proceedings of the Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2005), 8-10 September 2005, Wroclaw, Poland. IEEE Computer Society 2005*, pp. 332-337.

17. Gladkov L.A., Gladkova N.V. Osobennosti ispol'zovaniya nechetkikh geneticheskikh algoritmov dlya resheniya zadach optimizatsii i upravleniya [Features of use of fuzzy genetic algorithms for the decision of problems of optimisation and control], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 4 (93), pp. 130-136.
18. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Osnovy teorii evolyutsionnykh vychisleniy: monografiya [Fundamentals of the theory of evolutionary computing: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2010.
19. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N. Manufacturing Scheduling Problem Based on Fuzzy Genetic Algorithm, *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2014). Kiev, Ukraine, September 26 – 29, 2014*, pp. 209-213.
20. Gladkov L.A., Leiba S.N., Gladkova N.V., Legebokov A.A. Parallel Genetic Algorithm Based on Fuzzy Logic Controller for Design Problems, *Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOC 2016), Vol. 1: Artificial Intelligence Perspectives in Intelligent Systems.* – Springer International Publishing, Switzerland, 2016, pp. 147-157.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Гладков Леонид Анатольевич** – Южный федеральный университет; e-mail: leo@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371625; кафедра САПР; доцент.

**Гладкова Надежда Викторовна** – тел.: 88634393260; кафедра ДМ и МО; старший преподаватель.

**Gladkov Leonid Anatol'evich** – Southern Federal University; e-mail: leo@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371625; the department of CAD; associate professor.

**Gladkova Nadezhda Viktorovna** – phone: +78634393260; the department of DM&MO; senior teacher.

УДК 004.896

**В.В. Курейчик, А.Е. Глущенко, А.Н. Орлов**

### **ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ 3-Х МЕРНОЙ УПАКОВКИ\***

*Работа связана с решением одной из важных оптимизационных задач – задачей трехмерной упаковки разногабаритных элементов в объеме. Задача трехмерной упаковки разногабаритных элементов является NP-сложной и NP-трудной. В статье описывается гибридный подход к решению данной задачи. Приведена постановка и ограничения задачи трехмерной упаковки. Предложен модифицированный гибридный поиск, использующий многоуровневую эволюцию и позволяющий частично решать проблему предварительной сходимости алгоритмов. Принципиальным отличием предложенного подхода является разделение процесса поиска на два этапа и применение на каждом из этих этапов различных алгоритмов. На первом этапе поиска реализуется генетический алгоритм, позволяющий производить первоначальную эффективную перестановку блоков. На втором этапе поиска реализуется быстрый эволюционный алгоритм, позволяющий улучшить предыдущие решения. Такой гибридный подход, позволяет получать наборы квазиоптимальных решений, за полиномиальное время. Описан пример работы гибридного алгоритма решения задачи трехмерной упаковки блоков в объеме. Разработан программный комплекс и реализованы на ЭВМ алгоритмы автоматизированной трехмерной упаковки на основе гибридного поиска. Проведен вычислительный эксперимент на тестовых примерах (бенчмарках). Качество упаковки, полученной, на основе гибридного подхода, в среднем на 2,17 % превосходит результаты упаковки, полученные с использованием известных алгоритмов*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-00586).

*Ngoi et al., Bishoff и др., Gehring и др., что говорит об эффективности предложенного подхода. Проведенные серии тестов и экспериментов позволили уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов упаковки. В лучшем случае временная сложность алгоритмов  $O(n^2)$ , в худшем случае –  $O(n^3)$ .*

*Трехмерная упаковка; упаковка в контейнеры; гибридный подход; генетический алгоритм; генетические операторы; эволюционный алгоритм.*

**V.V. Kureichik, A.E. Glushchenko, A.N. Orlov**

## **HYBRID APPROACH FOR THREE-DIMENSIONAL PACKAGING PROBLEM**

*The article deals with one of the most important optimization problems – the problem of three-dimensional packaging (3DP) of various sized elements. It belongs to the class of NP-hard and complex problems. A hybrid approach for solving 3DP problem were developed. The formulation and restrictions of the 3DPP are considered in the article. Hybrid approach that uses a multi-level evolution and partially allows to avoid a preliminary convergence of algorithms. Genetic and evolutionary algorithms which obtain sets of quasi-optimal solutions in polynomial time were developed. Dividing of the search process in two stages and employment of different algorithms on stages is a conceptual difference of this approach. On the first stage of search is realized genetic algorithm, which allows to make initial block exchange. Evolutionary algorithm is used on the second stage of search, which allow to improve the previous solution. Developed approach allow to obtain sets of quasi-optimal solutions in polynomial time. Work of hybrid algorithm were showed on examples. To carry out computational experiments on test examples (benchmarks) the authors developed a software on the basis of hybrid approach for the 3DPP. Quality of packing obtained on the basis of the developed bioinspired approach is higher on average 2.17% than packing results obtained using known algorithms suggested by Ngoi et al., Bishoff et al., Gehring et al., which demonstrates the effectiveness of the proposed approach. Conducted tests and experiments allow possible to clarify the theoretical estimations of algorithm time complexity. In the best case algorithms the time complexity is represented as  $O(n^2)$ , in the worst case –  $O(n^3)$ .*

*Three-dimensional packaging; containers packaging; hybrid approach; genetic algorithm; genetic operators; evolutionary algorithm.*

**Введение.** Трехмерная упаковка разногабаритных элементов – проблема, возникающая во многих областях промышленности, связана с решением таких задач, как оптимальное заполнение пустых объемов, загрузка трюмов кораблей, товарных вагонов поездов, поддонов, транспортных самолетов, управление складами готовой продукции и т.п. В современном мире в условиях развивающихся производственно-технологических процессах все большую актуальность приобретает доставка продукции и товаров в сферу обращения. Это такие операции как перемещение, перегрузка, складирование товаров, формирование транспортных партий и т.д. Все это приводит к необходимости построения, анализа и совершенствования транспортно-грузовых информационных процессов. А также к разработке новых методов поддержки и оптимизации информационных процессов в контейнерных терминалах [1, 2].

Все задачи связанные с поддержкой и оптимизацией информационных процессов в контейнерных терминалах являются NP-полными. Это означает, что даже при небольшом количестве грузов решение данной задачи не возможно за полиномиальное время, даже при использовании современных суперкомпьютеров. Другой проблемой, являются дополнительные ограничения, возникающие при размещении груза в заданном пространстве. Поэтому актуальной и важной задачей является разработка новых гибридных подходов, методов и алгоритмов, основанных на биоинспирированном поиске [3–8].

**Постановка задачи упаковки.** Дадим формальное описание задачи упаковки грузов в ограниченном трехмерном пространстве. Дана область трехмерного пространства шириной  $W$ , длиной  $L$  и высотой  $H$ , а также множество блоков

$A=\{a_i\}$  количеством  $N$ . Все множество блоков разбито на подмножество типов  $T=\{t_j\}$ . Каждый тип определяет заданные параметры каждого блока, такие как, длина, ширина, высота и вес, ориентация по умолчанию [1, 6, 9–11]. Необходимо множество блоков разместить в заданный объем. Выходными данными будет являться план упаковки блоков в объеме, значение целевой функции (ЦФ) и время решения задачи.

Каждый тип груза характеризуется кортежем длины 4  $\langle l_i, w_i, h_i, m_i \rangle$ , где  $l_i, w_i, h_i$  – габаритные размеры элемента,  $m_i$  – вес блока. В ходе решения задачи положение элементов, обозначенное заданным типом, в пространстве задается множеством  $S=\{s_i=\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle \mid i=1, 2, \dots, n\}$ , где  $\langle x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} \rangle, \langle x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} \rangle$  – координаты углов элемента – самого близкого к началу осей координат и самого удаленного соответственно. Так же имеется параллелепипед  $M=\{L, W, H\}$ , где  $L, W, H$  – габаритные размеры области упаковки.

Используя критерий  $V$  – это отношение объема упакованных блоков к объему параллелепипеда  $V_{\text{кон}}$ , требующийся для упаковки всех элементов, введем следующие ограничения [9, 12]:

- 1) высота всех блоков одинаковая;
- 2) ни один элемент не может выходить за границы заданного объема, т.е. удовлетворять системе неравенств:

$$\begin{cases} x_{1i} \geq 0; \\ y_{1i} \geq 0; \\ z_{1i} \geq 0; \\ x_{2i} \leq L_x; \\ y_{2i} \leq W_y; \\ z_{2i} \leq H_z. \end{cases}$$

- 3) суммарный объем элементов не должен превышать объема области упаковки:

$$\sum_{i=1}^n (l_i \cdot w_i \cdot h_i) \leq L_x \cdot W_y \cdot H_z.$$

- 4) отсутствие пересечений (т.е. в одну область пространства нельзя поместить два объекта):

$$\begin{aligned} & (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) \vee (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) \vee \\ & (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) \vee (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) \vee \\ & (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) \vee (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) \vee \\ & (x_{2i} \cdot x_{1j} \& y_{2i} \geq y_{1j} \& z_{2i} \geq z_{1j}) = 1 \forall i \leq n, j \leq (i \neq j). \end{aligned}$$

- 5) суммарный вес всех блоков не может превышать заданный лимит:

$$\sum G_{\text{бл}} \leq G_{\text{лим}},$$

где  $G_{\text{бл}}$  – вес блока;  $G_{\text{лим}}$  – максимальный вес всех блоков.

- 6) все элементы должны опираться своим основанием на поверхность;

- 7) элементы должны лежать перпендикулярно заданной области.

Критерием оптимизации является объем, занимаемый блоками. Целевая функция имеет вид:

$$F = \frac{\sum V_{\text{бл}}}{V_{\text{кон}}} \rightarrow 1,$$

где  $V_{\text{бл}}$  – объем каждого блока,  $V_{\text{кон}}$  – объем контейнера.

Это означает, что необходимо уменьшить пустоты в области упаковки. Максимально эффективный результат решения задачи, когда целевая функция равна 1, т.е. область упаковки заполнена на 100 %.

Гибридный подход к упаковке блоков. На рис. 1 представлена укрупненная схема алгоритма гибридного поиска на основе многоуровневого подхода [8, 13, 14]. Здесь реализована идея многоуровневой эволюции, когда процесс поиска оптимального решения заключается в использовании нескольких алгоритмов – случайно направленного поиска – генетического и эволюционного. Поиск решения обычно продолжается до тех пор, пока не будет выполнен хотя бы один из критериев остановки. В данной работе критерием остановки является достижение определенного качества решений либо превышение максимального установленного времени работы алгоритма. Рассмотрим предложенный гибридный подход, основанный на биоинспирированном поиске более подробно.

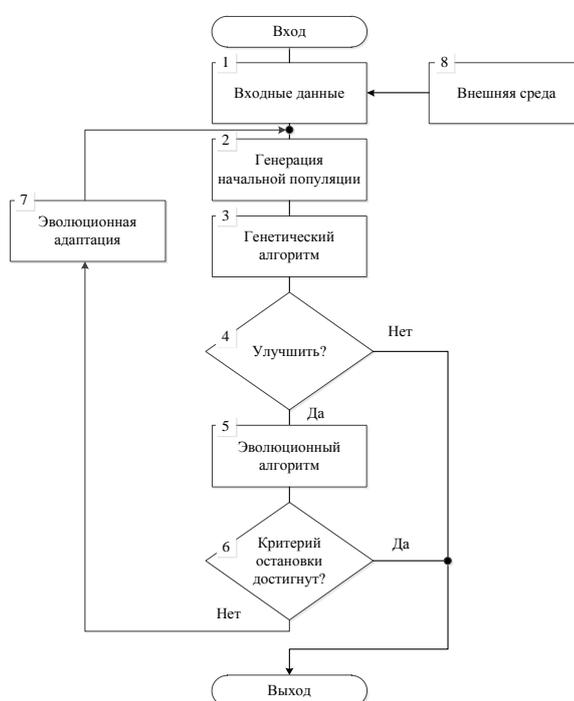


Рис. 1. Укрупненный алгоритм гибридного поиска

На первом этапе вводятся такие данные и параметры задачи, как: размер области упаковки, параметры блоков, количество блоков, вероятности применения операторов, размер популяции, число итераций, критерии остановки.

На блок «Входные данные» оказывает воздействие внешняя среда. В качестве внешней среды выступает лицо принимающее решение (ЛПР) – конструктор, оператор, который на основе личного опыта и статистических данных, заданных ограничений выбранной элементной базы принимает решение о значениях вводимых данных и параметров, которые управляют гибридным поиском, основанным на алгоритмах инспирированных природными системами. ЛПР вводит такие данные и параметры задачи, как: размер трехмерной области упаковки; параметры блоков; количество блоков; вероятности применения генетических операторов; размер популяции; число итераций; критерии остановки.

Затем в блоке «Генерация начальной популяции» создается множество альтернативных решений задачи упаковки. Создание начальной популяции происходит с помощью эвристики, которая основывается на последовательном алгоритме. После создания начальной популяции оценивается среднее значение ЦФ по всей популяции, а так же значение ЦФ каждого альтернативного решения.

Далее на первом уровне выполняется генетический алгоритм пока он не начнет сходиться. В генетическом алгоритме новые решения в популяции формируются путём реализации различных генетических операторов: кроссинговер, мутация и редукция [14–16].

Данный алгоритм имеет большую вычислительную сложность, однако гарантирует появления качественно новых решений, обладающих общими признаками, что позволяет реализовывать эффективный поиск внутри определенной области. Затем из наилучших решений создается новая популяция как объект второго уровня для реализации быстрого эволюционного поиска.

В эволюционном алгоритме новые решения, из полученных на этапе работы ГА, формируются путем реализации только одного оператора мутации [8, 15–17]. После применения эволюционного алгоритма идет проверка на завершение работы по критерию превышения максимально допустимого времени работы алгоритма. Если получено принципиально новое качественное решение, и критерий остановки достигнут, то сохраняется наилучший результат. В противном случае применяется эволюционная адаптация. Блок эволюционной адаптации предназначен для настройки процесса поиска. Процесс поиска решений продолжается итерационно до тех пор, пока не будут выполнены критерий остановки.

Критерии остановки гибридного поиска происходит с выполнением следующих условий:

$$\Delta > \Delta Z,$$

где  $\Delta$  – переменная, которая определяет сходимость значений ЦФ,  $\Delta Z$  – задается ЛПР.

$$t_{\text{вып}} < T_{\text{max}},$$

где  $t_{\text{вып}}$  – время, которое уже затрачено на выполнение алгоритма,  $T_{\text{max}}$  – максимально допустимое время решения алгоритма.

Отметим, что при получении эффективных решений после реализации генетического алгоритма процесс поиска может быть окончен.

Рассмотрим пример работы предложенного подхода для трехмерной упаковки блоков. На рис. 2 представлена начальная упаковка с плотностью размещения 58 %.

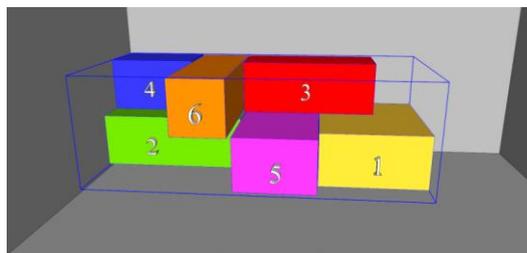


Рис. 2. Пример начального размещения 6 блоков

После реализации генетического алгоритма было получено следующее размещение, представленное на рис. 3 с плотностью размещения 62 %.

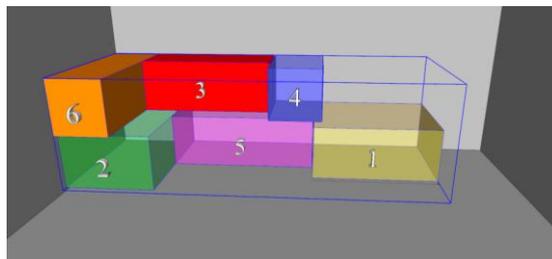


Рис. 3. Пример работы генетического алгоритма

Окончательная упаковка блоков представлена на рис. 4. В результате работы гибридного подхода плотность упаковки увеличилась до 65 %.

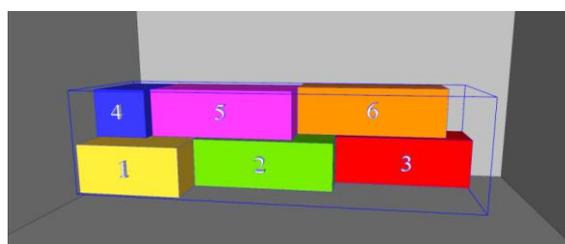


Рис. 4. Окончательная упаковка блоков

Применение предложенного гибридного алгоритма позволяет получать эффективные решения за полиномиальное время и за счет применения двухуровневого подхода частично решать проблему предварительной сходимости алгоритмов, а также рассматривать более перспективные и удалять заранее неперспективные решения.

**Экспериментальные исследования.** Для подтверждения эффективности гибридного подхода была разработана программная среда решения задачи трехмерной упаковки. При построении комплекса программ использовались пакеты Visual C++, Borland C++, Builder. Отладка и тестирование разработанных алгоритмов выполнялось на компьютере типа IBM PC с процессором core i5 с ОЗУ-6Гб. Проведен вычислительный эксперимент. Были проведены исследования времени и качества решения для разного набора тестовых примеров (бенчмарок), различающихся количеством блоков [18–20]. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Таблица 1

Сравнение гибридного алгоритма с аналогами

Количество блоков	Ngoi et al.	Bishoff и др.	Gehring и др.	Разработанный ГП
шт.	%	%	%	%
100	61,8	63,2	61,9	62,8
200	68,7	66,8	67,6	70,2
300	74,7	73,7	75,8	77,7
400	80,5	84,2	83,3	85,2
500	89,2	88,7	90,2	91,8
Среднее значение	75,02	75,32	75,76	77,54

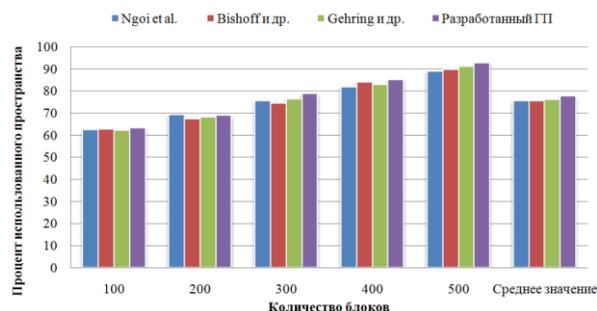


Рис. 5. Диаграмма сравнения эффективности упаковки блоков тестовых схем различными алгоритмами

Из анализа таблицы и диаграммы видно, что качество упаковки, полученное, на основе разработанных алгоритмов, в среднем на 2,17 % превосходит результаты упаковки, полученные с использованием известных алгоритмов Ngoietal., Bishoff и др., Gehring и др., что говорит об эффективности предложенного подхода.

Проведенные экспериментальные расчеты, показали, что гибридный алгоритм позволяет получать наборы локально-оптимальных решений за полиномиальное время.

**Заключение.** Разработан гибридный подход для решения задачи трехмерной упаковки. Отличительной особенностью данного подхода является использование многоуровневой эволюции, когда на разных уровнях применяются различные алгоритмы. На первом уровне классический генетический алгоритм с использованием различных генетических операторов, а на втором – быстрый эволюционный поиск. Такой подход позволяет получать наборы оптимальных и квазиоптимальных решений за полиномиальное время и частично решать проблему предварительной сходимости алгоритмов. Разработана программная среда на языке C++. Проведен вычислительный эксперимент. Проведенные серии тестов и экспериментов позволили уточнить теоретические оценки временной сложности алгоритмов. В лучшем случае временная сложность алгоритмов  $O(n^2)$ , в худшем случае –  $O(n^3)$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
2. Луцан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палетированием контейнеров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 196-204.
3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009. – 384 с.
4. Бова В.В., Курейчик В.В. Интегрированная подсистема гибридного и комбинированного поиска в задачах проектирования и управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 37-42.
5. Курейчик В.В., Бова В.В., Курейчик Вл.Вл. Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 90-94.
6. Курейчик В.М., Курейчик Л.В. Комплексный метод упаковки блоков // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2015. – № 1 (21). – С. 17-26.
7. Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл. Биоинспирированный поиск при проектировании и управлении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 178-183.
8. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.
9. Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Скубриева Е.С. Решение задачи трехмерной упаковки разногабаритных объектов с использованием бионических методов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 35-41.

10. Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю. Применение генетического алгоритма решения задачи трехмерной упаковки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 8-14.
11. Курейчик В.В., Глуценко А.Е. Эвристический подход для решения задачи 3-х мерной упаковки // I Всероссийская научно-техническая конференция "Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности". – 2015. – С. 399-401.
12. Нужнов Е.В., Барлит А.В. Трехмерная упаковка несвязных элементов на основе эвристических процедур. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 23 с.
13. Kasprzyk, J., Kureichik, V.M., Malioukov, S.P., Kureichik, V.V., Malioukov, A.S. General Questions of automated design and engineering // Studies in Computational Intelligence, 212, 2009. – P. 1-22.
14. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
15. Koide S., Suzuki S., Degawa S. A Palletize-Planning System for Multiple Kinds of Loads using GA Search and Traditional Search // Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. – IEEE. –1995. – Vol. 3. – P. 510-515.
16. Gehring H., Bortfeldt A. A genetic algorithm for solving the container loading problem // International Transactions in Operational Research. – 1997. – Vol. 4, Issue 5–6. – P. 401-418.
17. Chan F.T.S., Kumar N., Wong T.C. Three-Dimensional Air-Cargo Loading Problem: An Evolutionary Algorithm Based Approach // Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference. – 2006. – P. 758-765.
18. Chauny F. A Bloc Heuristic for the Container Loading Problem // Grouped'études et de recherche enalyse des decisions, Montréal. – 2005. – P. 1–18.
19. Kasprzyk J., Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Experimental investigation of algorithms developed (2009). Studies in Computational Intelligence, 212. – P. 211-223+227-236.
20. Жуков Л.А., Корчевская О.В. Метод плоскостей: численный эксперимент для задач двух и трехмерной ортогональной упаковки // Информационные технологии. – 2008. – № 11. – С. 41-45.

## REFERENCES

1. Emel'yanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p.
2. Lutsan M.V., Nuzhnov E.V. Reshenie zadachi trekhmernoy upakovki s paletirovaniem konteynerov [Solving three-dimension packing problem with palletizing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 196-204.
3. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. Bioinspirirovannye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 384 p.
4. Bova V.V., Kureychik V.V. Integrirovannaya podsystema gibridnogo i kombinirovannogo poiska v zadachakh proektirovaniya i upravleniya [Integrated subsystem hybrid and combined search in problems of design and management], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 37-42.
5. Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.V. Kombinirovannyy poisk pri proektirovanii [Combined search in the design], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational Resources and Technology], 2014, No. 2 (5), pp. 90-94.
6. Kureychik V.M., Kureychik L.V. Kompleksnyy metod upakovki blokov [Integrated packing method units], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Information, Computing and Engineering Education], 2015, No. 1 (21), pp. 17-26.
7. Kureychik V.V., Kureychik V.V. Bioinspirirovannyy poisk pri proektirovanii i upravlenii [Search inspired by natural systems, for the design and management], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 178-183.
8. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Rodzin S.I. Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy [The theory of evolutionary computing]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 260 p.
9. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Skubrieva E.S. Reshenie zadachi trekhmernoy upakovki raznogabaritnykh ob'ektov s ispol'zovaniem bionicheskikh metodov [The decision of the 3d-packing problem differently dimensional objects with use bionic methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (144), pp. 35-41.

10. Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu. Primenenie geneticheskogo algoritma resheniya zadachi trekhmernoй upakovki [Application of genetic algorithm to three-dimensional packaging problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 8-14.
11. Kureychik V.V., Glushchenko A.E. Evristicheskiy podkhod dlya resheniya zadachi 3-khmernoй Upakovki [Heuristic approach to solve the problem of 3-dimensional packaging], *I Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiya i informatsionnoy bezopasnosti"* [I all-Russian scientific-technical conference "fundamental and applied aspects of computer technology and information security"], 2015, pp. 399-401.
12. Nuzhnov E.V., Barlit A.V. Trekhmernaya upakovka nesvyaznykh elementov na osnove evristicheskikh protsedur [Three-dimensional packing of disjoint cells based on heuristic procedures]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2002, 23 p.
13. Kacprzyk J., Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. General Questions of automated design and engineering, *Studies in Computational Intelligence*, 212, 2009, pp. 1-22.
14. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
15. Koide S., Suzuki S., Degawa S. A Palletize-Planning System for Multiple Kinds of Loads using GA Search and Traditional Search, *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings*. IEEE, 1995, Vol. 3, pp. 510-515.
16. Gehring H., Bortfeldt A. A genetic algorithm for solving the container loading problem, *International Transactions in Operational Research*, 1997, Vol. 4, Issue 5–6, pp. 401-418.
17. Chan F.T.S., Kumar N., Wong T.C. Three-Dimensional Air-Cargo Loading Problem: An Evolutionary Algorithm Based Approach, *Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, 2006, pp. 758-765.
18. Chauny F. A Bloc Heuristic for the Container Loading Problem, *Grouped'études et de recherche en analyse des decisions, Montréal*, 2005, pp. 1-18.
19. Kacprzyk J., Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Experimental investigation of algorithms developed (2009), *Studies in Computational Intelligence*, 212, pp. 211-223+227-236.
20. Zhukov L.A., Korchevskaya O.V. Metod ploskostey: chislennyy eksperiment dlya zadach dvukh i trekhmernoй ortogonal'noy upakovki [The method of planes: numerical experiment for tasks two and three-dimensional orthogonal packing problems], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2008, No. 11, pp. 41-45.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

**Курейчик Владимир Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Орлов Антон Николаевич** – e-mail: ky92@mail.ru; 347924, г. Таганрог, ул. Воскова, 111/а, кв. 2; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Глушченко Александр Евгеньевич** – e-mail: alex-14-93@mail.ru; 347939, г. Таганрог, ул. Сызранова, 10, кв. 97; тел.: 89612941882; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Kureichik Vladimir Victorovich** – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Orlov Anton Nikolaevich** – e-mail: ky92@mail.ru; 111/a, Voskova street, ap. 2, Taganrog 347924, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; postgraduate student.

**Glushchenko Alexander Evgenyevich** – e-mail: alex-14-93@mail.ru; 10, Syzranova street, ap. 97, Taganrog, 347939, Russia; phone: +79612941882; the department of computer aided design; postgraduate student.

## Раздел II. Управление знаниями

УДК 004.822

**В.В. Бова**

### ПОДХОД К СОЗДАНИЮ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА\*

*Рассматривается новый подход к формированию корпоративных стратегий управления знаниями на основе модели компетенций как актуального метода повышения конкурентоспособности предприятий. Модель компетенций выполняет системообразующую и интегрирующую роль в задачах управления корпоративными знаниями, на ее основе реализуются процедуры оценки, подбора, развития и обучения персонала, работа с кадровым резервом, отдельные аспекты формирования системы мотивации. Рассматриваются проблемы выявления профилей компетентности специалистов, задачи их формализованного описания и формирования на этой основе базы знаний интеллектуальных информационно-аналитических систем предприятий, использующих онтологическую систематизацию как инструмент классификации объектов корпоративных знаний. Описана модель компетенций, интерпретируемая в терминах онтологии предметной области и обладающая способностью к отбору существенных признаков классифицируемых объектов знаний. Разработана модель управления знаниями, основанная на использовании эвристических методов описания и классификации профилей компетентности специалистов. Для решения задач классификации корпоративных знаний применяется метод кластеризации объектов в многомерном пространстве признаков, в котором используется генетический алгоритм, позволяющий получить эффективное решение для классификационной процедуры по нескольким известным критериям. Генетический алгоритм представляет собой итерационный вероятностный эвристический алгоритм поиска, особенностью которого является одновременное использование множества точек поиска (популяции) из пространства потенциальных решений. Преимуществом предложенного подхода является гарантированное отсутствие перекрытия для всех кластеров и отсутствие необходимости априори задавать количество кластеров. Экспериментальные исследования разработанного генетического алгоритма по трем критериям продемонстрированы на тестовых задачах и подтвердили теоретическую значимость и перспективность применения предложенного метода.*

*Интеллектуальные информационно-аналитические системы; системы управления знаниями; модель компетенций; классификация и кластеризация объектов знаний; генетический алгоритм; модель онтологии.*

**V.V. Bova**

### APPROACH TO THE CREATION OF KNOWLEDGE MANAGEMENT MODEL BASED ON GENETIC SEARCH METHODS

*The article discusses a new approach to the formation of the corporate knowledge management strategy based on the competency model as the current method of increasing the competitiveness of enterprises. Competency Model performs backbone and integrating role in enterprise knowledge management tasks on the basis of its assessment procedures are implemented, selection, development and training, work with the personnel reserve, some aspects of the formation of the system of motivation. The problems of identifying profiles of competence of experts, the prob-*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00242) в Южном федеральном университете.

*lem of formalized description and formation on this basis of the knowledge base of intelligent information-analytical systems of enterprises using ontological ordering of objects as a tool for classification of corporate knowledge. The model of competencies, interpreted in terms of the domain ontology and having the ability for the selection of the essential features of classified objects of knowledge. A knowledge management model based on the use of heuristic methods of description and classification of experts competence profiles. To solve the problems of classification of corporate knowledge objects used clustering method in the multidimensional space of attributes, which uses a genetic algorithm to obtain an effective solution for the classification procedure for several well-known criteria. A genetic algorithm is an iterative probabilistic heuristic search algorithm feature is the simultaneous use of multiple search points (population) in the space of potential solutions. The advantage of this approach is the lack of a guaranteed ceiling for all clusters and there is no need to set a priori the number of clusters. Experimental studies have developed a genetic algorithm based on three criteria are shown in the test problems and confirmed the theoretical significance and application prospects of the proposed method.*

*Intelligent information-analytical systems; knowledge management system; competency model; classification and clustering objects of knowledge; genetic algorithm; the ontological model.*

**Введение.** Технологии управления знаниями сегодня рассматриваются как мощное конкурентное преимущество в организациях (предприятиях, компаниях), ориентированных на постоянные изменения деловых процессов. Эффективность функционирования которых может быть достигнута трансформацией имеющейся в их распоряжении информации в знания [1–4]. Таким образом, чтобы обратить на пользу предприятию всю имеющуюся у него информацию, опыт и квалификацию сотрудников, повысить качество принимаемых решений и сократить время реакции на меняющиеся рыночные условия, необходимо создание единой информационной среды поддержки жизненного цикла знаний организации и целостной модели знаний специалиста для решения задач управления знаниями в корпоративных информационно-аналитических системах (КИАС).

Несмотря на большой объем публикаций по системам управления знаниями (СУЗ), их проблематика посвящена в основном разработке инструментальных средств и технологий, реализующих определенные функции и сервисы в операциях с информацией и знаниями [1–5]. Результаты исследований, посвященных научному обоснованию корпоративных стратегий управления знаниями, обеспечивающих вовлечение в бизнес-процессы организации не только явных, но и неявных (скрытых) знаний специалистов пока недостаточно. В условиях современной экономики неявные знания являются стратегическим и интеллектуальным ресурсом организаций, но все еще слабо используемых в задачах управления знаниями КИАС [6–8].

Одной из ключевых проблем вовлечения в бизнес процессы организаций значительных ресурсов неявных знаний, является проблема выявления профилей компетентности специалистов, их формализованного описания и формирования на этой основе соответствующей базы знаний (БЗ) СУЗ. В связи с этим актуальной является разработка модели управления знаниями, основанной на использовании эвристических методов описания и классификации профилей компетентности специалистов в многомерном пространстве признаков корпоративных компетенций КИАС. Сложность модели выбирается, исходя из необходимой ее выразительной возможности и заданного набора семантических зависимостей.

**Анализ и формулировка проблемы исследования.** Широкое проникновение компетентностного подхода в бизнес-среде диктует необходимость построения структурно-информационных моделей управления знаниями в КИАС, главным компонентом которых является БЗ моделей компетенций. Многие успешные организации применяют модель компетенций для интеграции стратегических задач корпоративных стратегий и тактическую работу со специалистами средствами унификации требований к компетенциям сотрудников [2, 6–8]. В результате ана-

лиза функций и свойств моделей компетентности специалистов [9], можно выделить основные задачи, в которых модель компетенций и ее моделирование может быть полезно для совершенствования функциональности СУЗ (рис. 1).



Рис. 1. Задачи, решаемые с использованием моделей специалистов в КИАС

Компетенция – термин предметной области субъекта труда, обладающий поведением в пространстве, образованном тремя векторами [6–9]: 1) качества человека (личности), формируемые под влиянием деятельности, но распространяющиеся на личность в целом; 2) содержание деятельности, в которой проявляются качества личности; 3) состояния признания (оценки) качества деятельности. Поведение компетенции представляет собой последовательное изменение ее свойств через процессы взаимного влияния качеств личности и содержания деятельности – траекторию развития компетенции. Таким образом, описание требований к поведению специалистов с помощью моделирования компетенций, их описания и выявления индикаторов поведения – это инструмент, который может применяться во всех областях знаний, где требуется работать с неявными знаниями в рамках корпоративной стратегии управления знаниями [4, 8–10].

Корпоративная модель знаний включает в себя следующие элементы (рис. 2):

- ◆ кластеры компетенций – наборы тесно связанных между собой корпоративных компетенций;
- ◆ таксономии корпоративных компетенций;
- ◆ профили компетентности специалистов, выделенные под конкретные роли пользователей для выполнения ряда практических задач управления знаниями;
- ◆ индикаторы поведения.



Рис. 2. Модель корпоративной стратегии управления знаниями

Одной из важных задач построения таких моделей является обеспечение их семантической функциональности (интероперабельности) как в рамках самой модели СУЗ (информационная система предприятия), так и при взаимодействии с внешними моделями (отраслевые или корпоративные информационные системы). Наиболее перспективным подходом к созданию корпоративных моделей знаний являются семантические технологии [3, 5, 11–15].

Использование методов онтологического моделирования позволяет конкретизировать модель компетенции [12, 13] и предоставляет возможность использовать модель при решении ряда прикладных задач КИАС. Онтологическая модель объектов корпоративных знаний состоит из словаря терминов таксономии компетенций, модели корпоративных знаний в проекции конкретной компетенции и семантических метаданных профиля компетентности специалиста.

В качестве модели компетентности специалиста, представленной на рис. 3 принимается следующий набор показателей  $MS = \{O, K, P\}$ , где  $O$  – общие характеристики специалиста;  $K$  – показатели компетентности специалиста в соответствующих областях знаний организации;  $P$  – характеристики поведения специалиста в СУЗ.

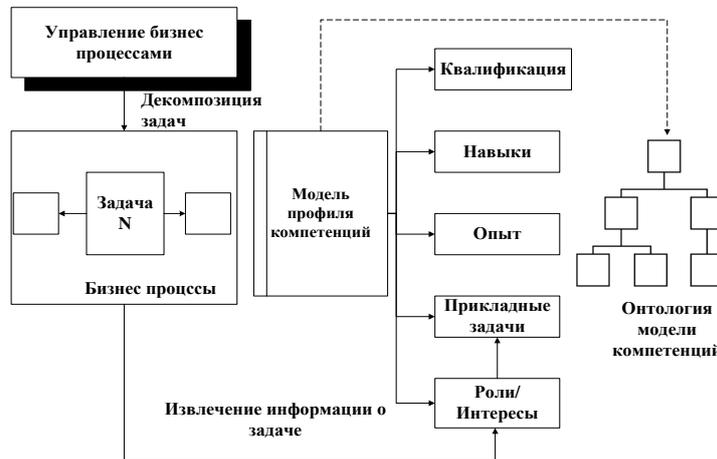


Рис. 3. Модель профиля компетентности специалиста

**Общая характеристика специалиста** включает декларативные данные о пользователе.

**Компетентность специалиста**  $K = \{K_o, K_c\}$ , включает показатели компетентности специалиста (квалификацию, навыки, опыт) по областям знаний  $K_o$  и их семантическое описание  $K_c$  на основе онтологий областей знаний;  $K_o = \{(O_i, k_i), \dots, (O_m, k_m)\}$ , где  $(O_i, k_i)$  – область знания  $i$  и уровень компетентности специалиста в этой области знаний;  $K_c$  – описание специалиста в виде набора семантических метаданных.

Под **семантическими метаданными** понимаются данные, описывающие контекст и/или содержание объекта в БЗ СУЗ с помощью понятий предметной области, определенных на языке описания онтологии [3]. Семантические метаданные для специалиста  $S_i$  можно определить, как конечное множество, упорядоченных пар  $(c_{ij}, k_{ij})$ , т.е.  $MetaD(s_i) = \{(c_{i1}, k_{i1}), \dots, (c_{im}, k_{im})\}$ , где  $c_{in} \in C$  – понятие онтологии, относящееся к объекту описания  $s_i$ ;  $k_{in} \in [0, 1]$  – коэффициент, обозначающий релевантность понятия  $c_{in}$  объекту  $s_i$ .

**Поведение специалиста** в КИАС – понятие, которое описывает некоторые характеристики взаимодействия специалиста с СУЗ. Для начала предлагается описывать поведение специалиста в СУЗ двумя параметрами  $P = \{R_i, Z_i\}$ , где  $R_i$  – роль для выполнения конкретного набора задач, которые соответствуют квалификации конкретного специалиста;  $Z_i$  – практические задачи, составляющие бизнес-процесс СУЗ.

Моделирование профилей компетентности и формирование на этой основе БЗ СУЗ имеет существенное значение для решения проблемы повышения эффективности реализации стратегий управления знаниями в КИАС [2, 8].

**Постановка задачи.** В настоящее время построению корпоративных систем управления знаниями на основе моделей компетенций отводится немаловажная роль в политике управления персоналом современных организаций. В одних компаниях профили компетенций используются в качестве прикладных инструментов конкретных HR-функций, а в других – система прописанных компетенций является ключевой в задачах управления знаниями организации [6]. Так как при группировке компетенций, требуемых для выполнения бизнес-процессов заранее неизвестно, в какие именно группы должны быть объединены эти компетенции, то задача их классификации сводится к задаче кластеризации.

Кластеры компетенций – модели компетенций, организованные в группы на основе базового намерения (интенции) [16]. Каждая компетенция – это набор родственных поведенческих индикаторов, объединенных в блоки в зависимости от смыслового объема компетенции.

Задача кластеризации заключается в определении групп объектов, которые являются наиболее близкими один к другому по некоторому критерию. При этом никаких предварительных предположений об их структуре, как правило, не делается. Задаче кластеризации сопутствуют две проблемы: определение оптимального количества кластеров и получение их центров и границ. Исходными данными для постановки задачи кластеризации являются значения параметров (признаков) объектов исследования и отыскании способа принятия оптимального решения о принадлежности проверяемого экземпляра к тому или иному классу в условиях неопределенности, т.е. в условиях действия случайных факторов, маскирующих связь между признаками и классом экземпляра [16]. В связи со сказанным выше представляет интерес применение методов решения задач кластеризации, основанных на эвристических алгоритмах [17–19].

Кластеризацию можно рассмотреть как задачу построения оптимального разбиения объектов на группы [20]. При этом оптимальность может быть определена как требование максимизации плотности кластеров или минимизации среднеквадратичного расстояния между центром кластера и всеми его объектами:

$$f = \sum_{l=1}^k \sum_{i \in S_l} d^2(X_i, \bar{X}_l), \quad (1)$$

где  $l$  – номер кластера ( $l = 1, 2, \dots, k$ );  $\bar{X}$  – центр  $l$ -го кластера;  $X$  – вектор значений переменных для  $i$ -го объекта, входящего в  $l$ -й кластер;  $d(X_i, \bar{X}_l)$  – расстояние между  $i$ -м объектом и центром  $l$ -го кластера.

Формализуем постановку задачи. Представим модель компетенций пользователя как  $U_i = \langle V_i, Z_i, K_i \rangle$ , где  $V_i(u) = \{(t_1, w_1(u)), (t_2, w_2(u)), \dots, (t_n, w_n(u))\}$  – векторное пространство модели знаний специалиста, включающее  $t_i$  – термин компетенции в модели,  $w_i$  – соответствующий вес  $t_i$ ;  $R_i(u) = \{(z_1, q_1(u)), (z_2, q_2(u)), \dots, (z_m, q_m(u))\}$  – роли пользователя при решении конкретных задач  $z_i$ , поддерживаемые бизнес процессами,  $q_i$  – индикатор компетенции для поддержки определенной роли;  $K_i$  – кластеры модели компетенций.

Представим  $V_i(u)$  точкой в  $n$ -мерном пространстве терминов. Для каждого термина рассчитывается его вес  $w_i$ , т.е. для каждого  $t_i$  мы можем определить его координату, состоящую из частот встречаемости терминов компетенции в роли пользователя при решении конкретных задач. Координатными осями в данном случае выступают термины. Число их определяется числом терминов, по которым проводится взвешивание, т.е. каждому  $t_i$  в роли  $R_i$  ставится в соответствие некоторый неотрицательный вес  $w_i$  и  $q_i$  – индикатор (степень соответствия) компетенции для поддержки определенной роли.

$$w_i = \frac{\delta_i \times \log\left(\frac{N}{n_i} + 0.01\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left[\delta_j \times \log\left(\frac{N}{n_j} + 0.01\right)\right]^2}}, \quad (2)$$

где  $\delta_i$  – коэффициент пропорциональности частоте встречаемости термина компетенции  $t_i$  в роли пользователя,  $N$  – общее количество определяемых задач с  $t_i$  для роли  $R_i$ ,  $n_i$  – номер задачи  $z_i$  в которой требуется компетенция  $t_i$ .

$$g_i = \sqrt{\sum_{t=1}^n (1 - Y_t(C_i^j))^2}, \quad (3)$$

где  $Y_t(C_i^j) = K_t^i, B_t^j$  – показатели экспертной оценки  $u_i$  сотрудника на  $R_i$  роль по  $t_i$  компетенции. Вектор  $K_t^i = (K_{t,1}^i, \dots, K_{t,n}^i)$ ,  $K_t^i \in [0,1]$  – нормированный показатель, определяющий коэффициент важности  $t_i$  компетенции для  $R_i$  роли. Вектор  $B_t^j = (B_{t,1}^j, \dots, B_{t,n}^j)$ ,  $B_t^j \in [0,1]$  – нормированный показатель, определяющий баллы полученные в результате экспертного анкетирования  $u_i$  сотрудника по  $t_i$  компетенции.

Термин компетенции представляется точкой в  $n$ -мерном пространстве. В каждый кластер входит какое-то количество терминов. Для определения центра кластера  $\mathcal{N}l$ , предполагаем, что центр – это первый термин.

Рассчитываем сумму расстояний от него до всех остальных терминов, входящих в кластер  $\mathcal{N}l$ . Сохранив полученную величину, предполагаем, что второй термин из кластера  $\mathcal{N}l$  – это центр. Рассчитываем сумму расстояний для него. Сохраняем результат. Продельваем то же самое для каждого термина, представленного в хромосоме и входящего в кластер  $\mathcal{N}l$ . Тот объект, для которого сумма расстояний до всех остальных терминов выборки будет минимальной, признается центром кластера  $\mathcal{N}l$ . Аналогично находятся центры остальных кластеров.

В рассматриваемой задаче целевая функция (1) является мультимодальной (многоэкстремальной), поэтому предпочтительно выбрать адаптивный метод случайного поиска с помощью генетического алгоритма (ГА), который позволяет эффективно находить квазиоптимальные решения для полиномиальное время [17–19]. Процесс генетического поиска (рис. 4) заключается в последовательном преобразовании одного конечного множества альтернативных решений в другое, используя для этого механизмы и принципы генетики и эволюции живой природы [18].

Целью работы является разработка эвристического метода кластеризации, основанного на применении ГА и отвечающего следующим требованиям.

1. Метод должен работать с метрическим пространством признаков достаточно большой размерности.
2. Алгоритм, построенный по данному методу, должен быть достаточно простым в реализации и потреблять минимум ресурсов.
3. Участие пользователя в процессе кластеризации должно сводиться к минимуму.

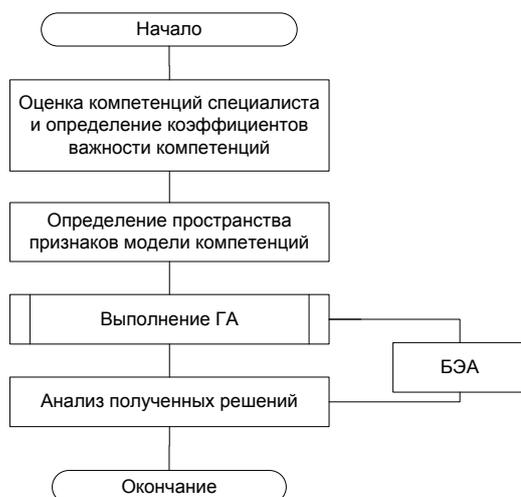


Рис. 4. Схема генетического поиска

### 3. Эвристический метод построения модели компетенций на основе ГА.

Далее рассмотрим стратегию адаптации ГА к задаче кластеризации. Гипотеза данного исследования заключается в том, что увеличить скорость поиска глобального экстремума можно за счет усиления изменчивости популяции с одной стороны и интенсификации процесса отбора лидеров с другой стороны.

Представим задачу кластеризации в терминах эволюционных вычислений. Рассмотрим ГА, работающий с популяцией, каждая их хромосом которой представляет собой возможное решение данной задачи. В нашем случае решение – это разбиение неупорядоченного набора компетенций специалистов на кластеры, определяющие профиль компетентности и релевантный список поведенческих индикаторов (ролей), необходимых для успешного решения задач управления корпоративными знаниями.

Для того чтобы применить ГА в качестве метода решения задачи кластеризации, должны быть определены следующие элементы алгоритма [17]:

- ◆ способ кодировки решения (хромосомы);
- ◆ функция оптимальности (оценки) каждой хромосомы;
- ◆ содержание операторов отбора (селекции), рекомбинации и мутации;
- ◆ условие завершения эволюции;
- ◆ вероятностные параметры управления сходимость эволюции.

Хромосома представляет собой массив (вектор компетенций специалиста, поведение – роль, кластер). Длина такого массива всегда будет такой, сколько корпоративных компетенций требуется разбить на кластеры. Эта информация представлена в БД моделей компетенций (рис. 2) идентификатором компетенции и номером кластера. Соответственно, если стоит задача разбить набор компетенций на  $L$  кластеров, то его значения варьируются от 1 до  $K$ .

Генерация альтернативных решений  $P$  производится на основе инициализации хромосом. Хромосома особи содержит в закодированном виде (или в виде массива чисел с плавающей точкой) значения пороговых коэффициентов модели компетенций пользователей  $U_i$ .

Каждая хромосома оценивается мерой ее «приспособленности» (*fitness-function* –  $FF$ ).  $FF$  для каждой хромосомы определяется суммой евклидовых расстояний от каждого термина до центра соответствующего кластера и рассчитывается по формуле:

$$f = \sum_{l=1}^k \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_l - X_i)^2}, \quad (4)$$

где  $\bar{X}$  – центр  $l$ -го кластера;  $X_i$  – координата  $i$ -го термина компетенции,  $k$  – количество терминов, которое одновременно определяет и длину хромосомы,  $n$  – количество координатных осей, по которым формируется общая координата термина.

Наиболее приспособленные особи получают большую возможность участвовать в воспроизводстве потомства. После того, как для каждой хромосомы получено значение FF, они упорядочиваются в соответствии с его величиной. В самое начало списка попадают те, мера приспособленности которых наибольшая, в конец – наименьшая. Далее при выборе потенциальных родителей применяется линейно убывающая функция случайного числа.

Пропорциональный отбор (селекция) назначает каждой  $i$ -ой хромосоме вероятность  $P(i)$ , равную отношению ее приспособленности к суммарной приспособленности популяции.

Следующим этапом работы ГА является выполнение оператора кроссинговера. Многоточечный кроссинговер в данном случае работает следующим образом. Точка разрыва представляет собой границу между соседними элементами массива (т.е. случайным образом выбирается номер компетенции). Количество их будет на единицу меньше, чем количество генов в хромосоме или количество кластеризуемых объектов. Родительские хромосомы разрываются в этих точках на сегменты. Затем соответствующие сегменты различных родителей склеиваются, и получают геноотипы потомков.

Далее выполняется операция мутации, которая в данной задаче представляет собой обмен двух случайных номеров кластеров. Номера компетенций  $t_i$ , для которых значения кластеров меняются местами, выбираются случайным образом.

В результате применения генетических операторов получается хромосома, представляющая собой возможный вариант решения. Для принятия решения об остановке алгоритма необходимо провести анализ качества полученных решений оценив их идентичность  $CS_i$  по критериям плотности  $sp_i$  (мера компактности – внутрикластерное расстояние) и сепарабельности  $cp_i$  (межкластерное расстояние) [16].

Не исключено, что в группе полученных решений имеются точки, принадлежащие области одного и того же экстремума. Для сравнения по двум упомянутым критериям требуется выполнить следующие вычисления:

$$sp_i = \min_l \left[ \sum_{l_i, l_j \in L_k} d(x_i, x_j)^2 \right], \quad (5)$$

где  $d(x_i, x_j)$  – расстояние между точками – «ближайшими соседями» из кластеров  $l_i$  и  $l_j$ .

$$cp_i = \max_l \left[ \sum_{i, j \in L_k} d(x_i, x_j)^2 \right], \quad (6)$$

где  $d(x_i, x_j)$  – расстояние между крайними точками кластера  $L_k$ .

$$CS_i = sp_i \times cp_i. \quad (7)$$

Таким образом «наихудший» кластер будет иметь наименьшее значение  $CS_i$ . Для осуществления обратной связи в архитектуре поиска введен блок эволюционной адаптации (БЭА), который на основе взаимодействия с внешней средой (лицом, принимающим решение) управляет процессом поиска и настройкой параметров ГА [16–19]. Он оказывает влияние на переформирование текущей популяции альтернативных решений и создание новой популяции.

**4. Экспериментальные исследования.** Программная реализация предложенного метода позволила провести его сравнительные испытания на задачах малой и средней размерности. Для сравнения результатов кластеризации по разработанному методу и по методу *k-means* использовались среднеквадратичное расстояние между центром кластера и всеми его объектами (4), минимальное межкластер-

ное расстояние (5) и максимальное внутрикластерное расстояние (6). В сравниваемых алгоритмах использовались одни и те же метрики признакового пространства модели компетенций и целевая функция.

В результате сравнения результатов автоматической кластеризации, полученной с помощью ГА, с результатами кластеризации, полученной с помощью алгоритма *k-means*, были сделаны выводы. При кластеризации с приоритетом точности поиска при малом количестве кластеров существенных преимуществ одного из алгоритмов не наблюдается (рис. 5). При увеличении числа кластеров наблюдается существенное преимущество ГА, что видно из графика (рис. 6).

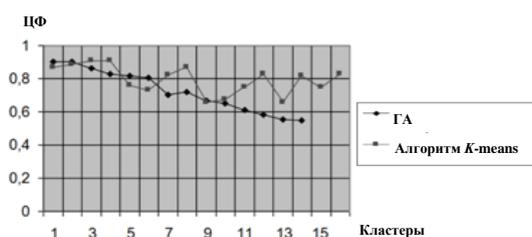


Рис. 5. Сравнение результатов кластеризации для тестовых задач малой размерности

Следует добавить, что предлагаемый метод всегда обеспечивает сепарабельность кластеров по всем координатам, что имеет весомое значение при решении задач распознавания.

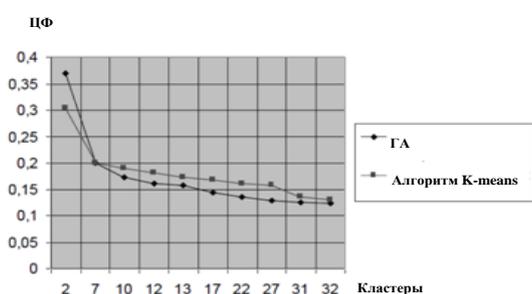


Рис. 6. Сравнение результатов кластеризации для тестовых задач средней размерности

Отметим также, что преимуществом ГА, как инструмента решения задачи оптимизации, является не только ускорение процесса поиска глобального экстремума, но и за счет усиленной изменчивости возможность избежать стагнации процесса глобального поиска.

**Заключение.** В статье рассмотрено перспективное направление построения БЗ КИАС, использующих онтологическую систематизацию как инструмент классификации объектов знаний. Предложена модель компетенций, интерпретируемая в терминах онтологии предметной области и обладающая способностью к отбору существенных признаков классифицируемых объектов. Для решения задач классификации корпоративных знаний предложен эвристический метод кластеризации объектов знаний в многомерном пространстве признаков, в котором используется ГА, позволяющий получить эффективное решение для классификационной процедуры по нескольким известным критериям. Преимуществом предложенного подхо-

да является гарантированное отсутствие перекрытия для всех кластеров и отсутствие необходимости априори задавать количество кластеров. Экспериментальные исследования разработанного ГА по трем критериям продемонстрированы на тестовых задачах и подтвердили теоретическую значимость и перспективность применения предложенного метода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бова В.В.* Концептуальная модель представления знаний при построении интеллектуальных информационных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 109-117.
2. *Bova V.V., Kureychik V.V., Legebokov A.A.* The integrated model of representation model of representation oriented knowledge in information systems // Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014. Astana, Kazakhstan. – P. 111-115.
3. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V.* Development of distributed information systems: Ontological approach // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 349. – P. 113-122.
4. *Кравченко Ю.А. Бова В.В.* Нечеткое моделирование разнородных знаний в интеллектуальных обучающих системах // Открытое образование. – 2013. – № 4 (99). – С. 70-74.
5. *Кравченко Ю.А., Марков В.В.* Онтологический подход формирования информационных ресурсов на основе разнородных источников знаний // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 116-120.
6. *Граецкая О.В., Корохова Е.В., Сомов А.С., Петракова А.В.* Модели принятия решений адаптации профессиональных компетенций к управлению высокотехнологичным проектом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 236-241.
7. *Михайлова А.В.* Понятие, сущность и виды компетенций при отборе и найме персонала // Экономика и социум. – 2012. – № 3. – С. 25-30.
8. *Филатова Е.В.* Профессиональная компетентность и оценка ее сформированности // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 65-70.
9. *Субетто А.И.* Онтология и эпистемология компетентностного подхода, классификация и квалиметрия компетенций. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2006. – 72 с.
10. *Запорожец Д.Ю., Кравченко Ю.А., Лежебоков А.А.* Способы интеллектуального анализа данных в сложных системах // Известия КБНЦ РАН. – 2013. – № 3. – С. 52-56.
11. *Бова В.В., Лецанов Д.В.* О вопросе интеграции ресурсов знаний на основе анализа и синтеза онтологий // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2014. – № 3 (18). – С. 14-22.
12. *Кравченко Ю.А.* Синтез разнородных знаний на основе онтологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 216-221.
13. *Вагин В.Н., Михайлов И.С.* Разработка метода интеграции информационных систем на основе метамоделирования и онтологии предметной области // Программные продукты и системы. – 2008. – С. 22-26.
14. *Родзина Л.С., Родзин С.И.* Мобильные обучающие системы и онтологии // Онтология проектирования. – 2013. – № 3 (9). – С. 70-81.
15. *Бова В.В., Лецанов Д.В., Кравченко Д.Ю., Новиков А.А.* Компьютерная онтология: задачи и методология построения // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2014. – № 4 (19). – С. 18-24.
16. *Шевченко И.В., Минашкин А.О., Осипчук Л.Н.* Эвристический метод кластеризации в метрическом пространстве признаков // Новые технологии. – 2009. – № 4 (26). – С. 101-106.
17. *Бова В.В., Заруба Д.В., Курейчик В.В.* Эволюционный подход к решению задачи интеграции онтологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 6 (167). – С. 41-56.
18. *Zaporozhets D.Yu., Zaruba D.V., Kureichik V.V.* Hybrid bionic algorithms for solving problems of parametric optimization // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 23. – P. 1032-1036.
19. *Бова В.В., Заммоев А.У., Дуккардт А.Н.* Эволюционная модель интеллектуального анализа разнородных знаний // Известия КБНЦ РАН. – 2013. – № 4 (54). – С. 7-13.
20. *Кулиев Э.В., Лежебоков А.А., Дуккардт А.Н.* Подход к исследованию окрестностей в роевых алгоритмах для решения оптимизационных задач // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 15-25.

## REFERENCES

1. Bova V.V. Kontseptual'naya model' predstavleniya znaniy pri postroenii intellektual'nykh informatsionnykh sistem [Conceptual model of knowledge representation in the constructing intelligent information systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 109-117.
2. Bova V.V., Kureychik V.V., Legebokov A.A. The integrated model of representation model of representation oriented knowledge in information systems, *Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014*. Astana, Kazakhstan, pp. 111-115.
3. Bova V.V., Kravchenko Yu.A., Kureichik V.V. Development of distributed information systems: Ontological approach, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, Vol. 349, pp. 113-122.
4. Kravchenko Yu.A. Bova V.V. Nechetkoe modelirovanie raznorodnykh znaniy v intellektual'nykh obuchayushchikh sistemakh [Fuzzy modeling heterogeneous knowledge intelligent tutoring systems], *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2013, No. 4 (99), pp. 70-74.
5. Kravchenko Yu.A., Markov V.V. Ontologicheskii podkhod formirovaniya informatsionnykh resursov na osnove raznorodnykh istochnikov znaniy [Ontological approach formation of information resources based on knowledge disparate sources], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 116-120.
6. Graetskaya O.V., Korokhova E.V., Somov A.S., Petrakova A.V. Modeli prinyatiya resheniy adaptatsii professional'nykh kompetentsiy k upravleniyu vysokotekhnologichnym proektom [Models of decision-making of adapting of professional competences to handle of the high-tech project], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5 (142), pp. 236-241.
7. Mikhaylova A.V. Ponyatie, sushchnost' i vidy kompetentsiy pri obore i nayme personala [The concept, nature and types of competencies in the selection and hiring of personnel], *Ekonomika i sotsium* [Economy and Society], 2012, No. 3, pp. 25-30.
8. Filatova E.V. Professional'naya kompetentnost' i otsenka ee sformirovannosti [Professional competence and assessment of its formation], *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Kemerovo State University], 2011, No. 1, pp. 65-70.
9. Subetto A.I. Ontologiya i epistemologiya kompetentnostnogo podkhoda, klassifikatsiya i kvalimetriya kompetentsiy [Ontology and epistemology of the competence approach, classification and qualimetry of competences]. Moscow: Issledovatel'skiy tsentr problem kachestva podgotovki spetsialistov, 2006, 72 p.
10. Zaporozhets D.Yu., Kravchenko Yu.A., Lezhebokov A.A. Sposoby intellektual'nogo analiza dannykh v slozhnykh sistemakh [Methods data mining in complex systems], *Izvestiya KBNTs RAN* [Izvestiya of Kabardino-Balkar scientific centre of the RAS], 2013, No. 3, pp. 52-56.
11. Bova V.V., Leshchanov D.V. O voprose integratsii resursov znaniy na osnove analiza i sinteza ontologiy [On the question of the integration of knowledge resources based on the analysis and synthesis of ontology], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, Computer science and Engineering Education], 2014, No. 3 (18), pp. 14-22.
12. Kravchenko Yu.A. Sintez raznorodnykh znaniy na osnove ontologiy [Synthesis of heterogeneous knowledge based on ontologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 216-221.
13. Vagin V.N., Mikhaylov I.S. Razrabotka metoda integratsii informatsionnykh sistem na osnove metamodelirovaniya i ontologii predmetnoy oblasti [Development of a method of integration of information systems based on metamodeling and ontology], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2008, pp. 22-26.
14. Rodzina L.S., Rodzin S.I. Mobil'nye obuchayushchie sistemy i ontologii [The mobile learning system and ontology], *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology Design], 2013, No. 3 (9), pp. 70-81.
15. Bova V.V., Leshchanov D.V., Kravchenko D.Yu., Novikov A.A. Komp'yuternaya ontologiya: zadachi i metodologiya postroeniya [Computer ontology: objectives and methodology], *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Information, Computing and Engineering Education], 2014, No. 4 (19), pp. 18-24.
16. Shevchenko I.V., Minashkin A.O., Osipchuk L.N. Evristicheskiy metod klasterizatsii v metricheskom prostranstve priznakov [Heuristic clustering method in metric feature space], *Novye tekhnologii* [New Technologies], 2009, No. 4 (26), pp. 101-106.
17. Bova V.V., Zaruba D.V., Kureychik V.V. Evolyutsionnyy podkhod k resheniyu zadachi integratsii ontologiy [The evolutionary approach for ontologies integration problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 6 (167), pp. 41-56.

18. Zaporozhets D.Yu., Zaruba D.V., Kureichik V.V. Hybrid bionic algorithms for solving problems of parametric optimization, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol. 23, pp. 1032-1036.
19. Bova V.V., Zammoev A.U., Dukkardt A.N. Evolyutsionnaya model' intellektual'nogo analiza raznorodnykh znaniy [An evolutionary model for intelligent analysis of heterogeneous knowledge], *Izvestiya KBNTs RAN [Izvestiya of Kabardino-Balkar scientific centre of the RAS]*, 2013, No. 4 (54), pp. 7-13.
20. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A., Dukkardt A.N. Podkhod k issledovaniyu okrestnostey v roevykh algoritmakh dlya resheniya optimizatsionnykh zadach [Approach to research environs in swarms algorithm for solution of optimizing problems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2014, No. 7 (156), pp. 15-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

**Бова Виктория Викторовна** – Южный федеральный университет; e-mail: vvbova@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Bova Victoria Victorovna** – Southern Federal University; e-mail: vvbova@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

УДК 002.53:004.89

**Ю.А. Кравченко, В.В. Марков, А.А. Новиков**

### **СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК В SEMANTIC WEB\***

*Представлен механизм семантического поиска, основанного на сочетании методов распространения активации с традиционными поисковыми механизмами. Большинство пользователей привыкли выражать свои информационные потребности с точки зрения ключевых слов. В традиционных механизмах поиска, документ, как правило, извлекается, когда хотя бы одно из ключевых слов в строке запроса находится внутри концепта. В нашем подходе предполагается получение всех экземпляров концептов, которые связаны с введенным ключевым словом, даже если оно не встречается внутри самого концепта. Предлагаемый алгоритм может быть использован для онтологии, в которой все отношения между вершинами имеют как описание, основанное на определениях онтологии, так и весовой коэффициент, рассчитываемый методом отображения весовых коэффициентов. Алгоритм имеет в качестве отправной точки начальный набор концептов из онтологии, которые будут называться узлами или нодами. Исходный набор концептов получается в результате работы классических механизмов поиска. Все узлы имеют некоторое начальное значение активации. Алгоритм распространения активации используется для поиска понятий в онтологии на основе начального набора концептов с соответствующими начальными значениями активации. Алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет достигнуто определенное состояние (например, заданный размер результирующего набора) или не осталось узлов, которые обрабатываются в приоритетной очереди.*

*Семантический поиск; онтология; Semantic Web; весовой коэффициент; алгоритм распространения активации.*

**Yu.A. Kravchenko, A.A. Novikov, V.V. Markov**

### **SEMANTIC SEARCH IN SEMANTIC WEB**

*This article presents the mechanism of semantic search based on a combination of activation methods of dissemination of traditional search engines. Most people are accustomed to express their information needs in terms of keywords. Traditional search engines, the document is*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-00703).

usually removed when at least one of the keywords in the query string is inside the concept. In our approach we are expected to obtain copies of all the concepts that are related to your keyword, even if it is not found within the concept. The proposed algorithm can be used for the ontology, in which all relations between the peaks have a description, based on the definitions of ontology, and a weighting factor, which is calculated by mapping the weighting factors. The algorithm has as a starting point an initial set of ontology concepts, which will be called nodes, or nodes. The initial set of concepts is the result of the work of classical search engines. All nodes have a initial value of activation. Spread activation algorithm is used to search for terms in the ontology based on the initial set of concepts with the corresponding initial values of activation. The algorithm runs as long until a certain condition (e.g., a predetermined size of the result set), or no more nodes are processed in a priority queue.

*Semantic search; ontology; Semantic Web; weight mapping; spread activation algorithm.*

**Введение.** В связи с растущим интересом к технологии Semantic Web можно предположить, что в скором времени станет доступен большой объем метаданных, описывающих ключевую информацию о ресурсах в сети Internet. Основной идеей является развитие поисковых процессов в гипермедиа приложениях с информацией, извлеченной из семантической модели предметной области. Для получения необходимых результатов в задачах семантического поиска все чаще используется сочетание методов распространения активации (spread activation) с традиционными поисковыми механизмами. Одной из основных проблем традиционных поисковых систем является то, что они, как правило, основаны на обработке ключевых слов [1]. Рассмотрим пример для ресурса научно-исследовательского учреждения, частично представленного на рис. 1.

Данный ресурс работает с людьми и публикациями в различных исследовательских областях. Здесь «Ключевое слово» не является концептом модели, а используется в диаграмме, чтобы отразить тот факт, что ключевое слово представлено внутри текста соответствующих экземпляров концептов. Например, ключевое слово «Web» определяется внутри концепта «Развитие Web приложений», так как оно находится внутри заголовка статьи. Ключевое слово «онтология» так же относится к данному концепту, т.к. оно появляется в описании статьи. Если пользователь будет искать узлы типа «профессор», то результат вполне может быть пустым, так как ключевое слово «Web» может не отображаться внутри текста описания (страницы) профессора. С другой стороны, анализируя семантику рассматриваемой предметной области, можно сделать вывод, что узел профессора, имеющего большое количество публикаций, связанных с этим ключевым словом, должен быть возвращен в качестве результата запроса. Таким образом, в рассмотренном примере узел профессора «Иванова» может быть представлен в результате запроса с ключевым словом «Web».

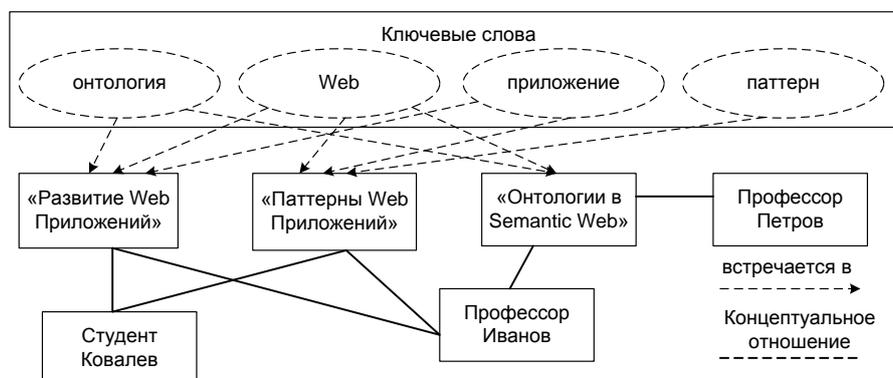


Рис. 1. Часть семантической модели

Описанный в примере механизм семантического поиска будет особенно эффективен, если пользователь ищет определенные экземпляры концептов, а не «произвольные» web-страницы, т.е. ключевые слова в запросе обозначают одно или несколько понятий. Другими словами, каждая страница является гипермедиа представлением узла в модели.

Некоторые существующие механизмы семантического поиска требуют от пользователя описание запроса с использованием других концептов, что накладывает на пользователя высокую семантическую нагрузку. Например, в большинстве семантических запросов, для нахождения информации о студентах, связанных с профессором «Ивановым», пользователь вынужден формировать запрос, состоящий из ключевых слов «Иванов», с указанием типа запрашиваемого понятия («Профессор»). Заранее заложенные типы понятий в ресурсе делают его более трудным для получения необходимой информации и описания запроса пользователем.

С учетом всех этих аспектов предлагается механизм семантического поиска, который позволяет пользователю выражать его потребности с точки зрения ключевых слов, но в то же время использует семантическую информацию и метаданные, относящиеся к предметной области, для получения результатов, которые невозможны при использовании традиционных механизмов поиска [2].

**1. Существующие механизмы поиска.** Большинство пользователей привыкли выражать свои информационные потребности с точки зрения ключевых слов. Механизм семантического поиска, который обрабатывает запрос как текстовую информацию и RDF аннотацию, представлен в статье [3]. Google также представляет собой очень интересный подход для поиска необходимой продукции. Это поисковая система, специализирующаяся на запросах, где пользователь выражает запрос с помощью ключевых слов, которые связаны с продуктом (бренд, название, модель и т.д.). Google пытается определить, какой продукт пользователь хочет найти, связывая ключевые слова в запросе с метаданными, которые описывают продукты в их базе знаний. Еще один интересный механизм семантического поиска SCORE [4]. Он использует методы автоматической классификации и извлечения информации, вместе с анализом метаданных и онтологии информации, позволяющие контекстный поиск сразу по нескольким ресурсам.

В традиционных механизмах поиска, документ, как правило, извлекается, когда хотя бы одно из ключевых слов в строке запроса находится внутри концепта. В нашем подходе предполагается получение всех экземпляров концептов, которые связаны с введенным ключевым словом, даже если оно не встречается внутри самого концепта. Отношения определяются с помощью алгоритма распространения активации, что дает возможность получить концепты, которые не содержат какое-либо из указанных в запросе слов [5].

Метод распространения активации является одним из часто используемых для обработки семантических сетей. Он успешно используется в различных областях, особенно в информационно-поисковых приложениях, т.к. он был разработан в области искусственного интеллекта (ИИ) в качестве основы для обработки семантических сетей и онтологий. Использование метода распространения активации поможет решить задачи обработки знаний в контексте Semantic Web.

Метод распространения активации работает в основном в качестве механизма поиска концептов. Учитывая первоначальный набор концептов и некоторых ограничений, во время прохождения через онтологию, достигаются другие узлы, которые тесно связаны с исходными концептами. Это очень мощный алгоритм по поиску семантической близости, где дан первоначальный набор понятий, в результате работы которого возвращается набор других понятий, тесно связанных с ними [6].

Метод распространения активации используется в семантических сетях (где каждое ребро в сети имеет описание, связанное с концептом) или в ассоциативных сетях (где каждое ребро имеет только весовой коэффициент, связанный с концептом).

Онтологии и их вершины несут гораздо больше информации, чем та, что указана в явном виде, т.к. есть много «скрытой» информации, которая кроется в связях между вершинами. В традиционных онтологиях, можно лишь указать на отсутствие или наличие связи между двумя экземплярами понятий. Но во многих случаях, необходимо выразить меру «прочности» в виде весового коэффициента, связанного с отношением между вершинами. Классический способ состоит в определении числового значения для каждого ребра в сети.

Основной идеей данной работы является извлечение знаний из онтологии, для получения весовых коэффициентов для каждого существующего экземпляра отношения в модели. Результатом является набор, где каждый экземпляр отношения имеет описание и весовой коэффициент. Похожая идея была предложена в работе [7], для описания нового подхода ранжирования результатов поиска в Semantic Web на основе онтологии. Для расчета весового коэффициента для каждого экземпляра отношения, используется метод отображения весовых коэффициентов (Weight Mapping), основанный на анализе ссылочной структуры базы знаний.

**2. Алгоритм распространения активации.** В статье предлагается гибридный алгоритм распространения активации, основанный на сочетании метода отображения весовых коэффициентов, описанного в статье, с традиционным методом распространения активации.

**Отображение весовых коэффициентов.** Необходимо дать числовую оценку для каждого экземпляра отношения в сети. Невозможно составить общую формулу для всех предметных областей, по которой будут рассчитываться лучшие весовые коэффициенты для каждого существующего экземпляра отношения в базе знаний. Например, в работе [7], расчет коэффициентов основывается на значимости отношений. Она пропорциональна специфике всех терминов, находящихся в отношении.

Предлагается использовать 3 различные меры оценки весового коэффициента связей между вершинами онтологии – кластерная, мера специфичности и комбинированная.

**Кластерная оценка.** Первая мера используется для установки степени сходства между двумя связанными экземплярами концептов. Используемая функция получена путем модификации функции из статьи [8] для концептов, которые связаны друг с другом. Приведенная ниже формула определяет сходство между концептами  $C_j$  и  $C_k$ .

$$W(C_j, C_k) = \frac{\sum_{i=1}^n n_{ijk}}{\sum_{i=1}^n n_{ij}}$$

Значение  $n_{ij}$  указывает на наличие связи между концептами  $C_j$  и  $C_k$  и равно 1, если концепты связаны между собой и 0 в противном случае. Значение  $n_{ijk}$  равно 1, если оба концепта  $C_j$  и  $C_k$  связаны с концептом  $C_i$  и 0 в противном случае. Таким образом, весовой коэффициент  $W(C_j, C_k)$  определяет близость этих двух концептов в виде процентного соотношения. Кластерная мера аналогична мере близости, предложенной в работе [9], которая широко применяется в алгоритмах поиска ассоциативных правил. Идея этой оценки заключается в том, что концепты, которые имеют большое количество общих отношений с другими концептами, являются схожими. Еще одним важным моментом является то, что эта оценка сходства является асимметричной; Ограничения в использовании симметричных коэффициентов подобия, рассматривается в статье [10].

**Оценка специфичности.** Вторая мера схожа с мерой инвертированной частотной области, часто используемой в сфере извлечения информации. Мету специфичности полезно учитывать, когда пользователь хочет указать семантическую особенность или установить различия связи. Следующая формула используется для измерения меры специфичности:

$$W(C_j, C_k) = \frac{1}{\sqrt{n_k}}$$

Значение  $n_k$  равно числу экземпляров данного типа связей, имеющие узел  $k$  в качестве узла назначения. Таким образом, весовой коэффициент специфичности связи обратно пропорционален числу связей с концептом  $C_k$ . Если несколько концептов имеют такой же тип, что и  $C_j$ , и связаны с концептом  $C_k$ , то весовой коэффициент специфичности  $W(C_j, C_k)$  будет высоким.

**Комбинированная оценка.** Третья мера является обобщенной оценкой, полученной как произведение двух предыдущих мер. Обе описанных ранее оценки могут быть использованы по отдельности в зависимости от выбранной семантики. Тем не менее, в общем случае комбинированная оценка, является предпочтительной. Первое слагаемое описывает схожесть двух концептов  $C_j$  и  $C_k$ . Второе указывает на специфичность связи между этими концептами. В сфере извлечения информации используют различные меры, в зависимости от предметной области и поставленных задач [11].

Вычисление значения весового коэффициента для экземпляра отношения может быть контекстно-зависимым. В зависимости от контекста, некоторые типы отношений могут быть важнее, чем другие. В данной статье все типы отношений имеют равный коэффициент важности. Для дальнейшего развития и получения более точных результатов необходимо предоставить пользователю возможность назначения коэффициентов важности для различных типов связей.

**Гибридный алгоритм распространения активации.** Предлагаемый алгоритм может быть использован для онтологии, в которой все отношения между вершинами имеют как описание, основанное на определениях онтологии, так и весовой коэффициент, рассчитываемый методом отображения весовых коэффициентов. Алгоритм распространения активации работает путем изучения концептов онтологии. Учитывая первоначальный набор концептов, алгоритм перемещается по связям в онтологии, получая в результате набор тесно связанных между собой концептов. Результирующий набор может содержать в себе концепты, которые явно не имеют отношений с концептами из начального набора.

Алгоритм имеет в качестве отправной точки начальный набор концептов из онтологии, которые будут называться узлами или нодами. Все узлы имеют некоторое начальное значение активации. Основная идея работы алгоритма заключается в том, что во время распространения активируются другие узлы, а в конце работы алгоритма получается набор узлов с вычисленным значением активации. Значение активации исходного набора узлов задается в качестве входного параметра алгоритма. Таким образом, можно установить различные значения активации исходных узлов в зависимости от их важности в контексте решаемой задачи. Если для узлов из начального набора не указано исходное значение активации, алгоритм устанавливает для каждого из этих узлов значение, равное единице. Все узлы, которые не находятся в исходном наборе имеют первоначальное значение активации, равное нулю [12, 13].

Узлы из начального набора располагаются в приоритетной очереди в порядке убывания значения активации. Узел с наибольшим значением активации извлекается из очереди для дальнейшей обработки. Если узел удовлетворяет всем описанным ограничениям, то активация распространяется на все узлы, связанные с исходным

$$I_j(t + 1) = O_i(t) * w_{ij} * f_{ij} * (1 - \alpha),$$

где  $i$  – начальный узел,  $j$  – узел назначения,  $I$  – обозначает вход, а  $O$  – выход. Выходное значение  $i$ -го узла добавляется к входному значению узла  $j$ . Значение активации для каждого найденного узла вычисляется путем умножения выходного значения узла  $O_i(t)$ , весового коэффициента ребра  $w_{ij}$ , факторов  $f_{ij}$  и коэффициента  $(1 - \alpha)$ .

Функция  $O_i(t)$  определяет выходное значение для узла  $i$ . Для нашего случая была выбрана линейная функция (значение на выходе равно входному значению). Значение  $w_{ij}$  равно весовому коэффициенту связи между узлами  $i$  и  $j$ . Значение  $f_{ij}$  соответствует удельному весу, связанному с диапазоном предметной области, в которой находятся узлы  $i$  и  $j$ . Значение  $\alpha$  – процент активации, который теряется каждый раз, когда происходит выход за диапазон предметной области, выступающий в качестве коэффициента затухания. Т.е. более короткие связи имеют преимущество перед более длинными. Нулевое значение коэффициента  $\alpha$  означает распространение активации без потерь. Значения всех рассмотренных выше параметров зависят от задачи и предметной области [14, 15].

Алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет достигнуто определенное состояние (например, заданный размер результирующего набора) или не осталось узлов, которые обрабатываются в приоритетной очереди. Алгоритм проходит по ребру между узлами только 1 раз  $O(E)$ . Приоритетная очередь имеет начальную сложность  $O \log(V)$ . Таким образом, общая сложность алгоритма распространения активации равна

$$O(|E| * \log(|V|)),$$

где  $E$  – число существующих отношений между концептами (ребер в графе), а  $V$  – число концептов (узлов в графе).

Главной проблемой алгоритмов распространения активации является прохождение по всем узлам онтологии и, как следствие, получения неверных результатов в конечном наборе концептов. Для решения данной проблемы необходимо вводить правила и ограничения. Они учитываются как до обработки узла из приоритетной очереди, так и после нее. Можно использовать следующие ограничения:

- ◆ ограничение по типу – когда активация не должна распространяться через узлы определенного типа;
- ◆ ограничение по количеству связей – когда активация не должна распространяться через узлы, которые связаны с большим количеством концептов, чем задано;
- ◆ ограничение расстояния – распространения активации должно быть завершено, если достигнуты узлы, находящиеся дальше, чем указанный порог.

**3. Семантический поиск.** Общая архитектура семантического поиска показана на рис. 2 [16]. Первые два шага совпадают с традиционным поиском. Пользователь выражает свой запрос с точки зрения ключевых слов, которые обрабатываются поисковой системой. Поисковая система имеет доступ ко всем существующим концептам в базе знаний, т.е. данным, которые связаны с метаданными, представленным в качестве узла онтологии. Для достижения поставленной цели каждому концепту из базы знаний сопоставляется узел в онтологии, являющийся конкатенацией всех свойств концепта.

Результатом традиционной поисковой системы является набор узлов, отсортированных по их сходству с ключевыми словами из запроса. Этот набор узлов подается в алгоритм распространения активации в качестве исходного набора узлов. Поисковая система определяет весовой коэффициент для каждого узла, который указывает относительную важность этого узла по отношению к запросу пользователя. Он используется в качестве начального значения активации

для узла. Таким образом, узлы, которые ранжированы поисковой системой будут иметь приоритет при работе алгоритма распространения, так как поиск начинается с узлов с максимальным значением активации [17].

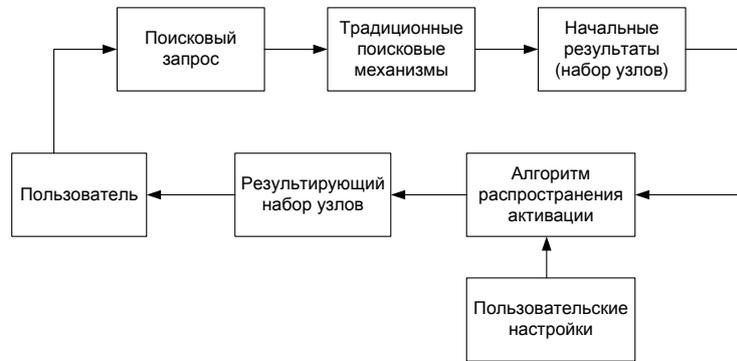


Рис. 2. Архитектура семантического поиска

Алгоритм распространения активации выполняется в соответствии с семантикой предметной области. Результатом работы алгоритма является набор узлов, при этом окончательный список узлов может не совпадать с результатами, полученными с использованием алгоритмов традиционного поиска. В зависимости от задачи, выполняемой пользователем, могут накладываться ограничения на некоторые связи между узлами онтологии. Кроме того, некоторые отношения могут быть более важными, чем другие. Все эти значения указываются при настройке алгоритма распространения активации инженером знаний, специалистом в конкретной предметной области. Значения весовых коэффициентов для всех типов отношений задаются с помощью конфигурационного XML файла [18].

Результирующий набор узлов упорядочивается по важности каждого узла для конкретного запроса пользователя. Например, исходя из рисунка 1, если запрос состоял из слов «онтология» и «web», то в результирующем наборе первым узлом будет идти «профессор Иванов», так как он имеет 3 публикации, связанные с ключевыми словами запроса, чем «профессор Петров», имеющий лишь 1 публикацию в этой области. Этот результат непосредственно связан с принципом работы алгоритма распространения активации.

Важным аспектом данного подхода является сохранение полного пути, пройденного алгоритмом, от начального до результирующего узла. Учитываются узлы с наибольшим весовым коэффициентом. Эта информация необходима специалисту для оценки и отладки поискового механизма в случае, если результирующий набор узлов не является удовлетворительным для конкретной задачи. Алгоритм распространения активации дает возможность «фильтровать» результаты поиска, например, пользователь может быть заинтересован в узлах, относящихся только к определенному типу (только узлы типа «Профессор» и т.д.).

**4. Экспериментальные исследования.** Первым приложением, выбранным для проведения тестирования, был web-сайт одной из кафедр (Dep) [19]. На данном web-сайте можно получить информацию об основных исследовательских направлениях, профессорах, проектах, студентах, лабораториях и публикациях. База знаний имеет около 2,630 узлов с 6,554 отношениями. Вторым приложением является сайт университета (Sfedu) [20], где так же представлена информация об институтах и кафедрах, профессорах и студентах, проектах и публикациях.

Для проведения экспериментальных исследований было выбрано два типа тестов. Первый заключается в поисковом запросе, который отражает лишь одну из тем, относящихся к области информационных технологий. Результатом будет являться динамически сгенерированная страница, связывающая сформированный запрос с множеством других узлов на сайте. Т.е. имея тему в качестве входных данных для запроса, в результате система предоставляет страницу с ключевыми ссылками на профессоров, студентов, публикации и т.д., связанные с данной темой. Второй заключается в использовании более чем одной темы в запросе. Идея заключается в том, чтобы сформировать первоначальный запрос, который будет носить весьма общий характер, чтобы проанализировать, как будет изменяться ранжирование узлов, при добавлении в запрос новой темы.

Экспериментальные исследования проводились в системе, разработанной на языке Java. В качестве традиционного поискового механизма использовался «движок» Lucene [21]. Система поддерживает весь процесс разработки семантического поиска, состоящего из следующих задач:

- ◆ импорт онтологии;
- ◆ настройка весовых коэффициентов;
- ◆ настройка алгоритма распространения активации;
- ◆ интеграция с рассматриваемыми приложениями.

Система имеет внутреннее представление онтологии и ее экземпляров, позволяющее осуществить преобразование импортируемой онтологии. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Краткое изложение полученных результатов

Приложение	Тип теста	Количество найденных узлов
Dep	1	20
Dep	2	13
Dep	2 (без вес. коэф.)	19
Sfedu	1	25
Sfedu	2	16
Sfedu	2 (без вес. коэф.)	25

Для сравнения предложенного гибридного подхода с традиционными поисковыми механизмами, был проведен тот же набор тестов с использованием семантической сети онтологии без функциональных возможностей отображения весовых коэффициентов. При этом результаты, полученные во время первого теста, полностью совпадали с результатами второго теста. Для достижения лучших результатов с использованием алгоритма семантического поиска необходимо предусмотреть множество нюансов, связанных с выбором наилучшего пути распространения активации. Несмотря на достижение хороших результатов, результаты, полученные с помощью гибридного подхода, были всегда выше, и требовали гораздо меньше усилий со стороны инженера знаний. Полученные результаты показывают, что алгоритм распространения активации с отображением весовых коэффициентов дает лучшие результаты и требует меньше времени для настройки, чем алгоритм семантического поиска.

**Заключение.** Предложен семантический поиск, основанный на традиционных поисковых механизмах в сочетании с информационным поиском на основе онтологий. Он позволяет определить неявные связи между концептами, описанными с помощью контекстной информации с семантически значимыми экземплярами онтологии, которые представлены в базе знаний.

Предложенный алгоритм распространения активации работает путем изучения концептов онтологии. Учитывая первоначальный набор концептов, алгоритм перемещается по связям в онтологии, получая в результате набор тесно связанных между собой концептов. Результирующий набор может содержать в себе концепты, которые явно не имеют отношений с концептами из начального набора. Значимость весовых коэффициентов, предложенных для использования в гибридном алгоритме распространения активации, выставляется лицом принимающим решение и зависит от конкретной предметной области и поставленных целей.

Главная проблема предложенного алгоритма распространения активации заключается в том, что не существует семантической интерпретации значения активации для всех узлов онтологии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Курейчик В.М.* Особенности построения систем поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 92-98.
2. *Kravchenko Yu.A., Kureichik V.V.* Knowledge management based on multi-agent simulation in informational systems // Conference proceedings. 8th IEEE International Conference “Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014”. – 15-17 October 2014, Astana, Kazakhstan. – P. 264-267.
3. *Davies J., Weeks R., and Krohn U.* QuizRDF: Search Technology for the Semantic Web // WWW2002 workshop on RDF & Semantic Web Applications, Proc. WWW2002, Hawaii, USA, 2008.
4. *Sheth A., Bertram C., Avant D., Hammond B., Kochut K., and Warke Y.* Managing Semantic Content for the Web // IEEE Internet Computing. – 2012. – No. 6 (4). – P. 80-87.
5. *Бова В.В.* Концептуальная модель представления знаний при построении интеллектуальных информационных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 109-117.
6. *Курейчик В.В., Родзин С.И.* О правилах представления решений в эволюционных алгоритмах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 13-21.
7. *Stojanovic N., Struder R., and Stojanovic L.* An Approach for the Ranking of Query Results in the Semantic Web. Proc. of ISWC '03 (Sanibel Island, FL, October 2003), SpringerVerlag, 2013. – P. 500-516.
8. *Chen H., and Ng T.* An Algorithmic Approach to Concept Exploration in a Large Knowledge Network (Automatic Thesaurus Consultation); Symbolic Branch-and-Bound vs. Connectionist Hopfield Net Activation // Journal of the American Society for Information Science. – 2005. – No. 46 (5). – P. 348-369.
9. *Srikant R., and Agrawal R.* Mining generalized association rules // Proceedings of VLDB '95. – 2010. – P. 407-419.
10. *Peat H., and Willet P.* The limitations of term co-occurrence data from query expansion in document retrieval systems // Journal of the American Society for Information Science. – 2012. – No. 42 (5). – P. 378-383.
11. *Башмаков А.И., Башмаков И.А.* Интеллектуальные информационные технологии: учеб. пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с.
12. *Kureichik V.M., Rodzin S.I.* Evolutionary algorithms: genetic programming // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2002. – Vol. 41, No. 1. – P. 123-132.
13. *Анечков М.И., Бова В.В., Новиков А.А.* Эволюционный подход к созданию нейросетевой модели коллективного решения интеллектуальных задач // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2015. – № 5 (67). – С. 24-30.
14. *Кулиев Э.В., Самойлов А.Н., Новиков А.А.* Когнитивная архитектура агентов мультиагентной системы // Информатизация и связь. – 2016. – № 2. – С. 116-120.
15. *Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З.* Системы управления знаниями (методы и технологии) / под общ. ред. В.З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.
16. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V.* Decision Support Systems for Knowledge Management // Software Engineering in Intelligent Systems. Proceedings of the 4th Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015), Vol. 3. – Springer International Publishing AG Switzerland. – P. 123-130.

17. *Кравченко Ю.А.* Синтез разнородных знаний на основе онтологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 141-145.
18. *Кравченко Ю.А., Марков В.В.* Онтологический подход формирования информационных ресурсов на основе разнородных источников знаний // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 116-120.
19. PUC-Rio Informatics Dept. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.inf.puc-rio.br> (дата обращения: 13.05.2016).
20. Южный Федеральный Университет [Электронный ресурс]. – URL: <http://sfedu.ru> (дата обращения: 13.05.2016).
21. *Курейчик В.М., Кажаров А.А.* Использование шаблонных решений в муравьиных алгоритмах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 11-17.

## REFERENCES

1. *Kureychik V.M.* Osobennosti postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Features of decision making support system design], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 92-98.
2. *Kravchenko Yu.A., Kureichik V.V.* Knowledge management based on multi-agent simulation in informational systems, *Conference proceedings. 8th IEEE International Conference "Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014". 15-17 October 2014, Astana, Kazakhstan*, pp. 264-267.
3. *Davies J., Weeks R., and Krohn U.* QuizRDF: Search Technology for the Semantic Web, *WWW2002 workshop on RDF & Semantic Web Applications, Proc. WWW2002, Hawaii, USA, 2008*.
4. *Sheth A., Bertram C., Avant D., Hammond B., Kochut K., and Warke Y.* Managing Semantic Content for the Web, *IEEE Internet Computing*, 2012, No. 6 (4), pp. 80-87.
5. *Bova V.V.* Kontseptual'naya model' predstavleniya znaniy pri postroenii intellektual'nykh informatsionnykh sistem [Conceptual model of knowledge representation in the constructing intelligent information systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 109-117.
6. *Kureychik V.V., Rodzin S.I.* O pravilakh predstavleniya resheniy v evolyutsionnykh algoritmakh [On the rules for the submission decisions in evolutionary algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 13-21.
7. *Stojanovic N., Struder R., and Stojanovic L.* An Approach for the Ranking of Query Results in the Semantic Web. Proc. of ISWC '03 (Sanibel Island, FL, October 2003), SpringerVerlag, 2013, pp. 500-516.
8. *Chen H., and Ng T.* An Algorithmic Approach to Concept Exploration in a Large Knowledge Network (Automatic Thesaurus Consultation); Symbolic Branch-and-Bound vs. Connectionist Hopfield Net Activation, *Journal of the American Society for Information Science*, 2005, No. 46 (5), pp. 348-369.
9. *Srikant R., and Agrawal R.* Mining generalized association rules, *Proceedings of VLDB '95*, 2010, pp. 407-419.
10. *Peat H., and Willet P.* The limitations of term co-occurrence data from query expansion in document retrieval systems, *Journal of the American Society for Information Science*, 2012, No. 42 (5), pp. 378-383.
11. *Bashmakov A.I., Bashmakov I.A.* Intellektual'nye informatsionnye tekhnologii: ucheb. Posobie [Intelligent information technologies: a tutorial]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2005, 304 p.
12. *Kureichik V.M., Rodzin S.I.* Evolutionary algorithms: genetic programming, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2002, Vol. 41, No. 1, pp. 123-132.
13. *Anchekov M.I., Bova V.V., Novikov A.A.* Evolyutsionnyy podkhod k sozdaniyu neyrosetevoy modeli kollektivnogo resheniya intellektual'nykh zadach [An evolutionary approach to create neural network models of collective decision of intellectual tasks], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestija Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN], 2015, No. 5 (67), pp. 24-30.
14. *Kuliev E.V., Samoylov A.N., Novikov A.A.* Kognitivnaya arkhitektura agentov mul'tiagentnoy sistemy [Cognitive architecture of agents multi-agent systems], *Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication]*, 2016, No. 2, pp. 116-120.

15. *Tuzovskiy A.F., Chirikov S.V., Yampol'skiy V.Z.* Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii) [The knowledge management system (methods and technology)], under ed. V.Z. Yampol'skogo. Tomsk: Izd-vo NTL, 2005, 260 p.
16. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V.* Decision Support Systems for Knowledge Management, *Software Engineering in Intelligent Systems. Proceedings of the 4th Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015), Vol. 3.* Springer International Publishing AG Switzerland, pp. 123-130.
17. *Kravchenko Yu.A.* Sintez raznorodnykh znaniy na osnove ontologii [Synthesis of heterogeneous knowledge based on ontologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 141-145.
18. *Kravchenko Yu.A., Markov V.V.* Ontologicheskii podkhod formirovaniya informatsionnykh resursov na osnove raznorodnykh istochnikov znaniy [Ontological approach formation of information resources based on knowledge disparate sources], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 116-120.
19. PUC-Rio Informatics Dept. [Electronic resource]. Available at: <http://www.inf.puc-rio.br> (accessed 13 May 2016).
20. Yuzhnyy Federal'nyy Universitet [Electronic resource]. Available at: <http://sfedu.ru> (13 May 2016).
21. *Kureychik V.M., Kazharov A.A.* Ispol'zovanie shablonnykh resheniy v murav'inykh algoritmakh [Template using for ant colony algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 11-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.М. Ошхунов.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [yakravchenko@sfedu.ru](mailto:yakravchenko@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Марков Владимир Васильевич** – e-mail: [v\\_v\\_mar@mail.ru](mailto:v_v_mar@mail.ru); кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Новиков Антон Александрович** – e-mail: [anton.a.novikov@gmail.com](mailto:anton.a.novikov@gmail.com); кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: [yakravchenko@sfedu.ru](mailto:yakravchenko@sfedu.ru); 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

**Markov Vladimir Vasilyevich** – e-mail: [v\\_v\\_mar@mail.ru](mailto:v_v_mar@mail.ru); the department of computer aided design; associate professor.

**Novikov Anton Alexandrovich** – e-mail: [anton.a.novikov@gmail.com](mailto:anton.a.novikov@gmail.com); the department of computer aided design; postgraduate.

УДК 002.53:004.89

**Ю.А. Кравченко, И.О. Курсытс, Э.В. Кулиев**

## **РАЗРАБОТКА ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СЕМАНТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ\***

*Статья посвящена разработке нового подхода к оценке семантической близости для решения различного рода задач управления знаниями (knowledge management). В связи с постоянным ростом информационных потоков в различных сферах жизни задачи поиска новых способов хранения, представления, формализации, систематизации и обработки*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00242) в Южном федеральном университете.

информации из гетерогенных источников представляются актуальными на сегодняшний день. Основная проблема в области поиска знаний заключается в постоянно растущей сложности идентификации и использования ключевой информации. Для ее решения предложена модификация ранее разработанного фильтра знаний, функционирующего на основе построения семантического дерева таксономии понятий, как систематизации сложноорганизованных областей действительности и знания, имеющих иерархическое строение, с целью определения и упорядочивания терминов и их синонимов, с дальнейшим преобразованием пользовательского запроса в наиболее эффективную форму. В мета-модель фильтра знаний добавлен блок оценки семантической близости, на основе которого будет производиться выдача наиболее подходящих с точки зрения семантики результатов. Проведен анализ поставленной задачи: дано определение семантической близости, рассмотрены различные подходы для ее расчета. Предложена графовая модель компонентов триплетов онтологий, приведена формула вычисления семантической близости. Для повышения эффективности подхода разработан генетический алгоритм расчета семантической близости в соответствии с графовой моделью. Предложен ряд модифицированных генетических операторов кроссинговера и мутации. Проведены вычислительные эксперименты на тестовых примерах (бенчмарках). Вычислена временная сложность разработанного алгоритма. Проведенные серии тестов и экспериментов показали эффективность применения данного подхода.

Управление знаниями; онтологии; мета-модели; семантическая близость; графовая модель; генетический алгоритм.

**Yu.A. Kravchenko, I.O. Kursitys, E.V. Kuliev**

#### **THE DEVELOPMENT OF GENETIC ALGORITHM FOR SEMANTIC SIMILARITY ESTIMATION IN TERMS OF KNOWLEDGE MANAGEMENT PROBLEMS**

*This article is devoted to the development of a new approach for semantic similarity estimation to solve different knowledge management problems. Due to information flows constantly growing in various life spheres the problems of searching new ways of storing, representation, formalization, systematization and processing of information from heterogeneous sources are relevant today. The main problem in the field of knowledge search is the complexity of identification and usage of key information, which is increasing constantly. To solve this problem we propose to modify previously developed knowledge filter running on the basis of the semantic concepts taxonomy tree as an systematization of complex areas of the reality and hierarchical knowledge in order to define and arrange terms and its synonyms with a further query transformation into the most effective form. The knowledge filter meta-model is supplemented by a semantic similarity estimation block, that allows us to obtain the most appropriate results in the context of semantics. We analyzed the assigned problem, gave a definition of the term 'semantic similarity', and observed different ways of its estimation. To solve the problem we proposed the graph model containing components of ontology triplets. The semantic similarity formula is presented in this paper. To increase the efficiency we developed the genetic algorithm for semantic similarity estimation in accordance with the graph model. A set of genetic operators of crossover and mutation is proposed for genetic algorithm work. Experiments carried out on benchmarks show the efficiency of developed approach.*

*Knowledge management; ontologies; meta-model; semantic similarity; graph model; genetic algorithm.*

**Введение.** В современном мире процесс развития общества характеризуется постоянно возрастающей ролью информационных технологий в науке, производстве и управлении. Повсеместное распространение информационных технологий и доступа к сети Интернет привело к тому, что за последние годы существенно увеличился объем генерируемой, передаваемой и обрабатываемой информации. В связи с этим актуальными на сегодняшний день являются задачи поиска новых способов хранения информации, ее представления, формализации и систематиза-

ции, а также автоматической обработки. Таким образом, растет интерес к всеобъемлющим базам знаний, которые возможно использовать для различных практических задач. Огромный интерес вызывают системы, способные без участия человека извлечь какие-либо сведения из текста. Как результат, на фоне вновь возникающих потребностей развиваются новые технологии, призванные решить заявленные проблемы.

В настоящее время проблемой поиска знаний занимаются специалисты в области управления личными и корпоративными знаниями (Knowledge Management), так как это позволит сократить временные и трудовые затраты на выполнение задач и принятие решений, как на рабочем месте, так и в повседневной жизни [1, 2]. Особенно остро стоит проблема поиска знаний в сети Интернет, т.к. при постоянно растущем количестве информации, извлечь действительно нужную и важную информацию становится все труднее [3].

Основная проблема в области поиска знаний заключается в постоянно растущей сложности идентифицирования и использования ключевой информации. Одним из способов решения данной проблемы является усовершенствование подходов семантического моделирования в направлении интерпретации и использования в качестве априорных данных профилей поиска других пользователей, преследующих схожие цели [4, 15–16].

**1. Фильтр знаний.** Для решения проблем, возникающих в сфере управления знаниями, в работе [4] было предложено использовать фильтр предварительной обработки поисковых запросов – фильтр знаний. Важной проблемой, препятствующей повышению эффективности запросов поиска информации в неоднородных распределенных источниках знаний, является семантическое несоответствие представления исследователя (пользователя) о составлении запроса и форме его выражения и того, как запрос должен быть выражен на основе конкретного интерфейса используемой информационной системы. Фильтр знаний функционирует на основе построения семантического дерева таксономии понятий, как систематизации сложноорганизованных областей действительности и знания, имеющих иерархическое строение, с целью определения и упорядочивания терминов и их синонимов, с дальнейшим преобразованием пользовательского запроса в наиболее эффективную форму.

Оценка качества модифицированного запроса проводится на основе многокритериальной модели поддержки принятия решений, которая определяет «вес» запроса по синтаксическим, семантическим, категориальным и приоритетным критериям.

Основными достоинствами предложенного в [4] фильтра знаний являются:

- 1) поддержка семантического поиска релевантных знаний на основе онтологических моделей;
- 2) использование информационных энциклопедических справочных систем различной функциональности для усовершенствования формы поискового запроса;
- 3) повышение эффективности запроса пользователя на основе использования репозитория прецедентов.

Кроме того, в работе [4] разработана мета-модель фильтра знаний, позволяющая определить семантику сквозного потока операций, управляющего всем поисковым процессом, включая спецификацию запроса, переформулировку запроса, разбиение запроса, выбор веб-сервиса, выбор источника знаний, результаты ранжирования и представление рекомендаций (рис. 1).

Для повышения эффективности работы представленного фильтра знаний предлагается ввести дополнительный блок расчета семантической близости между объектами поиска, который будет использоваться агентом ранжирования.

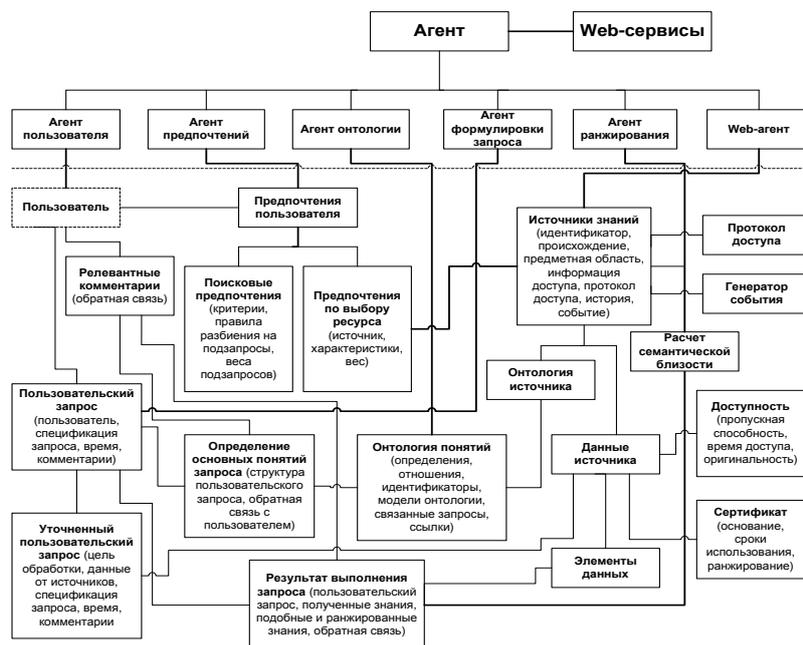


Рис. 1. Мета-модель фильтра знаний

Согласно данной модели, агент пользователя отвечает за взаимодействие и применение пользовательских настроек, которыми управляет Агент предпочтений. Предпочтения включают в себя: вес термина, обозначающий его относительную значимость; важность результатов запроса; предпочтения различных источников знаний и т.д. Агент Предпочтений может также изучить предпочтение пользователя на основе опыта и обратной связи, связанной с предыдущими запросами.

Агент онтологии имеет доступ к образам моделей исследуемых предметных областей, определенных с помощью открытого стандарта конструкции онтологии – веб-языка Онтологии (OWL). Энциклопедические справочные системы позволяют агенту онтологии использовать обобщающие тематические термины и синонимы.

Первоначальный запрос пользователя, попадая Агенту формулировки запроса, впоследствии совершенствуется Агентом онтологии на основе семантической обработки, обеспеченной доступными моделями онтологий предметных областей и энциклопедическими справочными системами. Переформулированный запрос разбивается Агентом формулировки запроса на подзапросы, предназначенные для надлежащих источников знаний. Это поддерживает семантическое посредничество терминологии, используемой в онтологии модели предметной области и справочных системах с используемыми локальными источниками. Кроме того, перевод запроса необходим, чтобы получить данные из предназначенных неоднородных источников знаний.

Агент ранжирования несет ответственность за сбор результатов подзапросов от различных источников знаний, оценивая их по семантическим критериям согласно требованиям Агента предпочтений. Предпочтения определяются на основе веса авторитетности используемого ресурса (от 0 до 10) и веса термина, включенного в запрос.

Основная роль Web-агента – получение переформулированного запроса, после обработки Агентом онтологии и разбиения на подзапросы Агентом формулировки запроса. Web-агент отправляет подзапросы и адаптирует неоднородные распределенные источники знаний с учетом аспектов: пользовательской настройки

ресурсов; авторитетности и репутации ресурса; соглашения об условиях использования; оценки размера ответов на подзапрос; меры качества обслуживания сетевого трафика и динамической рабочей нагрузки ресурса [5, 20].

Каждый агент в представленной мета-модели управляет соответствующими классами объектов, обрабатывает спецификации и веб-сервисы. Например, пользователь определяет Пользовательские предпочтения, которые могут быть специализированы для Поисковых Предпочтений и Предпочтений по выбору ресурса. Пользователь излагает Пользовательский запрос, у которого есть несколько Понятий запроса, которые поочередно взаимодействуют с Онтологией понятий. Агент Онтологии управляет и Пользовательским запросом и Онтологией понятий, которые предоставляются Онтологией Источника. Онтология источника и Данные источника – специализации Источника. Источником управляет Web-агент [4, 17].

Пользовательский запрос содержит несколько уточненных запросов, каждый из которых изложен к нескольким источникам данных, которые обеспечивают один или несколько элементов данных в качестве результата запроса. На основе возвращенного результата запроса пользователь может использовать обратную связь относительно уместности результата и других комментариев.

Результаты поиска влияют на развитие метаданных, связанных с предпочтениями пользователя, формулировкой запроса, использованием источника данных и ранжированием результата. Мета-модель фильтра знаний может быть реализована в виде реляционной базы данных [4].

**2. Семантическая близость.** Под семантикой текста обычно понимается его «смысл», который автор текста хотел передать посредством символов, однако для компьютерной системы смысл текста строго зависит от контекста, где он определяется и обрабатывается. В области семантического веба лучшим средством представления семантики является онтология.

Онтологические модели обладают следующими преимуществами:

- ◆ Обеспечение простоты развития системы;
- ◆ Возможность получения в результате запроса не «сырых» данных, а логического вывода на основе хранимых данных;
- ◆ Легкость моделирования сложных связей и отношений, по сравнению с базами данных;
- ◆ Возможность использования согласованной (разделяемой всеми) терминологии с точно определенной семантикой, позволяющего интегрировать и использовать данные (информацию) из разных источников;
- ◆ Возможность динамического изменения данных [6, 19].
- ◆ Под онтологической моделью (онтологией)  $O$  понимается знаковая система  $\langle C, P, I, L, T \rangle$ , где:

$C$  – множество элементов, которые называются понятиями;

$P$  – множество элементов, называемые свойствами (двуместными предикатами);

$I$  – множество экземпляров понятий;

$L$  – множество текстовых меток или значений понятий и свойств;

$T$  – частичный порядок на множестве  $C$  и  $P$ .

Оценкой близости между документом и запросом является числовое значение, которое выражает степень сходства между ними; оценка близости называется оценкой семантической близости, если и только если она определена на основе семантики документов и запросов.

В работе [7] сделан обзор методов вычисления мер семантической близости термов внутри онтологий. Выделяют следующие типы мер семантической близости:

1) таксономические – на основе иерархических (родовидовых, таксономических) связей;

2) реляционные – на основе неиерархических (ассоциативных, проблемно-специфических, «горизонтальных») связей между терминами онтологии и атрибутивные.

Методики на основе иерархических отношений подразделяются на:

1) основанные на определении кратчайшего пути (количество ребер или вершин) между вершинами;

2) основанные на определении глубины таксономического дерева;

3) учитывающие глубину наименьшей общей родовой вершины – ближайшего общего родителя (least common subsumer – LCS);

4) основанные на понятии общей специфичности двух вершин.

При этом вводятся некоторые ограничения, например, ограничивают конфигурацию пути: длину пути и количество перегибов.

Для расчета меры семантической близости на основе неиерархических (ассоциативных связей) используют сравнение с третьим понятием плюс рекурсивное уточнение [7].

Атрибутивную меру близости рассчитывают по значениям общих атрибутов двух понятий [8].

Интерес представляют так называемые гибридные методы, используемые для учета всех характеристик двух термов при расчете меры семантической близости и содержащие оценку близости экземпляров, состоящую из трех частей – таксономической, реляционной и атрибутивной [8]:

$$S(i_1, i_2) = t \cdot S^t(i_1, i_2) + p \cdot S^p(i_1, i_2) + a \cdot S^a(i_1, i_2), \quad (1)$$

где  $i_1, i_2$  – объекты, между которыми требуется найти семантическую близости;  $t, p, a$  – коэффициенты, определяющие «вес» меры каждого типа в общей мере.

Недостатком большинства мер, основанных на онтологических структурах, является симметричность. Экспертные оценки показывают, что мера близости не всегда симметрична как для иерархических отношений, так и для ассоциативных. Другой актуальной задачей является определение семантической близости онтологических термов, не связанных иерархически, однако, имеющих определенную проблемно-специфическую («горизонтальную», ассоциативную) связь.

Задача определения семантической близости является особо актуальной в узкоспециализированных предметных областях, так как при выделении специализированной области знания из более общей, многие понятия оказываются расположенными слишком далеко от своего родового понятия, которое является чересчур общим и принадлежит более общей предметной области, в которую «вложена» рассматриваемая. Таким образом, в специализированных предметных областях оказывается значительное количество терминов, не имеющих родовидовых связей, либо таксономия для них имеет всего один уровень (предок-потомок).

Для устранения указанных недостатков в работе [9] было предложено использовать графовую модель расчета семантической близости.

С помощью набора предикатов  $P$  онтологии могут описываться различные отношения между понятиями и экземплярами. Эти отношения задаются с использованием простых утверждений (триплетов)  $\langle s, p, o \rangle$ , где  $s$  и  $o$  – это субъект и объект высказывания, а  $p \in P$  – это предикат онтологии  $O$  [9].

Будем считать, что любому свойству  $p \in P$  может быть задан весовой коэффициент (семантический вес)  $pv \in [0, 1]$ , задающий смысловую близость между субъектом и объектом утверждения (значение коэффициента 1 означает, субъект и объект считаются сходными по семантике, значение коэффициента 0 – не похожими). Задание значений коэффициентов  $pv$  для предикатов выполняется специалистами-разработчиками в соответствии с их пониманием онтологии и потребностями решаемых задач.

Построим неориентированный граф  $G$  всех имеющихся субъектов и объектов триплетов, имеющихся в базе знаний, в соответствии со следующими правилами:

- ◆ используются только те триплеты, у которых значения весовых коэффициентов предикатов не равны нулю ( $pv \neq 0$ );
- ◆ вершинами графа являются субъекты и объекты триплетов, а ребра графа, соединяющие субъекты с объектами имеют веса, равные значению  $pv$  предиката того триплета, с использованием которого они были сформированы;
- ◆ инверсное отношение (на основе предиката owl:inverseOf) между предикатами  $p1$  ( $pv1$ ) и  $p2$  ( $pv2$ ) добавляет в граф два ребра с весами  $pv1$  и  $pv2$ ;
- ◆ симметричное отношение добавляет в граф два ребра с равными весами, например, <owl:sameAs> добавляет два ребра со значениями  $pv = 1.0$ .

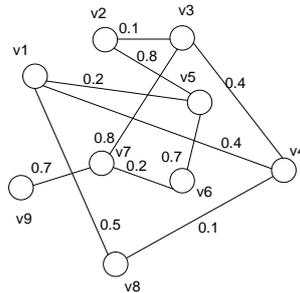


Рис. 2. Абстрактная графовая модель компонентов триплетов

Обозначим через  $Sim(\alpha, \beta)$  семантическую близость между элементами  $\alpha$  и  $\beta$ , где  $\alpha, \beta \in C \cup I \cup P \cup T$ . С учетом использования указанной графовой модели семантическая близость будет определяться как

$$Sim(\alpha, \beta) = \max_{i=1 \rightarrow k} (Sim_{PATH_i}(\alpha, \beta)), \quad (2)$$

где  $k$  – число возможных путей графа  $GO$  от вершины  $\alpha$  до вершины  $\beta$ .

Под путём  $PATH(\alpha, \beta)$  между двумя вершинами  $\alpha$  и  $\beta$  графа  $GO$  понимается набор рёбер (предикатов) ведущих от вершины  $\alpha$  до вершины  $\beta$ , с учётом их направленности.

Значение семантической близости между элементами  $\alpha$  и  $\beta$  по направлению пути  $i$   $Sim(\alpha, \beta)$  определяется по следующей формуле:

$$Sim_{PATH_i}(\alpha, \beta) = \prod_{j=1}^{h_i} pv_{i,j} \quad (3)$$

где  $h_i$  – число семантических отношений между элементами  $\alpha$  и  $\beta$  на пути  $i$ ;  $pv_{i,j}$  – значение веса ребра на основе  $j$ -го семантического предиката на пути  $i$ .

Тогда формула определения семантической близости между элементами онтологии  $\alpha$  и  $\beta$  будет иметь вид

$$Sim(\alpha, \beta) = \max_{i=1 \rightarrow k} (Sim_{PATH_i}(\alpha, \beta)) = \max_{i=1 \rightarrow k} \left( \prod_{j=1}^{h_i} pv_{i,j} \right). \quad (4)$$

Величина  $Sim(\alpha, \beta)$  удовлетворяет следующим свойствам:

- 1)  $Sim(\alpha, \beta) \in [0,1]$ ;
- 2)  $Sim(\alpha, \beta) = 0$  при отсутствии пути от  $\alpha$  к  $\beta$ ;
- 3)  $Sim(\alpha, \alpha) = Sim(\beta, \beta) = 1$ .

В исключительном случае  $Sim(\alpha, \beta)$  может равняться 1, при условии существовании инверсного отношения между элементами  $\alpha, \beta$ .

Для вычисления семантической близости между вершинами  $\alpha$  и  $\beta$  графа  $G$  используется функция  $Sim(\alpha, \beta)$ , которая возвращает максимальное значение близости по возможным путям между вершинами  $\alpha$  и  $\beta$ . Функция  $Sim(\alpha, \beta)$  вызывает на выполнение функцию  $PATH(\alpha, \beta)$ , которая в свою очередь вызывает функцию  $PATH(\alpha, \beta, Path)$ .

Функция  $PATH(\alpha, \beta, Path)$  является рекурсивной и вызывается для каждого не пройденного ребра, исходящего из вершины  $\alpha$ , при этом параметр  $\alpha$  и список ребер по пути  $Path$  изменяются.

Работа функции  $PATH(\alpha, \beta, Path)$  прекращается при следующих условиях:

(1) По новому пути  $Path$  не получается максимального значения близости ( $<maxWeight$ ), при этом условие ( $maxWeight > 0$ ) означает существование пути между исходной вершиной  $\alpha$  и конечной вершиной  $\beta$ .

(2) Вершина  $\alpha$  была пройдена ( $\alpha \in PassedVertex$ ).

(3) Вершины  $\alpha$  и  $\beta$  совпали ( $\alpha = \beta$ ).

Так как количество компонентов онтологий может быть непредсказуемо большим, можно говорить о том, что задача оценки семантической близости между ними относится к классу NP-полных. Это означает, что для них не существуют точные эффективные, отличные от полного перебора, алгоритмы, а полный перебор не даст решения за полиномиальное время.

На сегодняшний день конкурентоспособность при решении многих NP-трудных задач доказали генетические алгоритмы (ГА). Их эффективность особенно отмечена в тех задачах, где математические модели настолько сложны, что применение стандартных методов оптимизации, например, ветвей и границ, динамического или линейного программирования, крайне затруднено [10, 14].

**3. Генетический алгоритм расчета семантической близости.** Для повышения эффективности подхода, описанного в [9] предлагается использовать генетический алгоритм расчета семантической близости.

Преимущества ГА перед другими оптимизационными и поисковыми процедурами заключаются в следующем:

1) в ГА поиск оптимизации задачи осуществляется не с одним решением, а с множеством решений. Это позволяет находить новые решения на основе старых решений, которые являются лучшими среди множества. Таким образом, свойства оптимальных решений развиваются;

2) решение задачи является закодированной структурой, а не совокупностью параметров. Благодаря этому увеличивается скорость процесса обработки данных, т.е. быстродействие оптимизационного поиска;

3) для оценки приспособленности той или иной хромосомы в дополнение к подсчету ее целевой функции задаются правила выживания в исследуемой популяции. Это развивает разнообразие популяции, что способствует повышению вероятности нахождения правильного решения;

4) при создании популяции, скрещивании или изменении хромосом используются вероятностные правила, которые вносят в направленность генетического поиска элементы случайности, что позволяет повысить шансы преодоления локальных оптимумов [11, 13, 18].

Помимо вышеперечисленных качеств, генетические алгоритмы обладают следующими свойствами:

1) достаточно широкая область применения алгоритмов;

2) возможность комбинирования генетических алгоритмов с другими методами, в том числе и неэволюционными алгоритмами;

3) эффективность алгоритма в поиске решений в пространстве большой размерности;

4) отсутствие ограничений на вид целевой функции;

5) наглядность схемы построения генетических алгоритмов [12].

Разработанный генетический алгоритм работает с графовой моделью субъектов и объектов триплетов, описанной в разделе 2. Задача оценки семантической близости состоит в нахождении максимального произведения весовых коэффициентов на пути, ведущем от вершины  $\alpha$  к вершине  $\beta$ .

Хромосома представляет собой последовательность вершин, представляющая собой путь из вершины  $\alpha$  в вершину  $\beta$ . Хромосомы генерируются случайным образом. Приспособленность хромосом определяет целевая функция.

Подсчет целевой функции производится в соответствии с заданными весовыми коэффициентами предикатов по принципу выявления такой последовательности вершин, при которой произведение коэффициентов будет максимальным. Пусть  $pv_1, pv_2, \dots, pv_n$  – весовые коэффициенты предикатов, заданные специалистами при разработке онтологии. Тогда ЦФ будет сводиться к максимизации

$$\prod_{i=1}^n pv_i \rightarrow \max. \quad (5)$$

Для решения задачи оценки семантической близости с помощью генетического алгоритма использовались следующие правила [11, 13–14]:

1) С заданной вероятностью реализуется оператор кроссинговера над генотипами наиболее приспособленных хромосом. Далее с вероятностью 0,5 выбирается один из потомков  $P_i(t)$  и сохраняется как член новой популяции.

2) К  $P_i(t)$  применяется оператор инверсии и оператор мутации с заданными вероятностями. Полученный генотип сохраняется как  $P_k(t)$ .

Для работы генетического алгоритма был применен ряд генетических операторов. Это двухточечный, модифицированный трехточечный и модифицированный жадный операторы кроссинговера; одноточечный оператор мутации, модифицированный оператор мутации на основе дихотомии, модифицированный оператор мутации с равновероятным распределением и оператор инверсии.

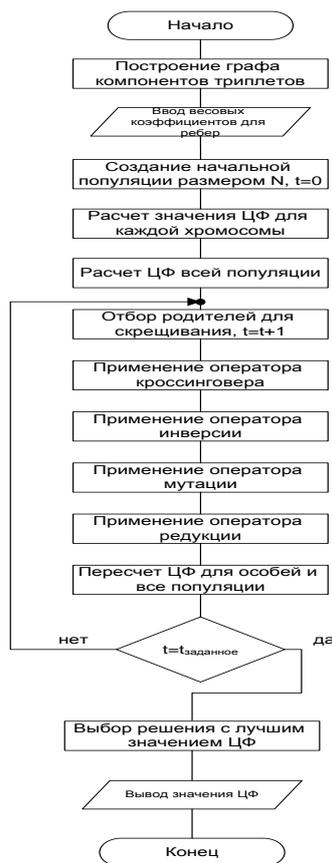


Рис. 3. Генетический алгоритм расчета семантической близости

Условие останова генетического алгоритма – достижение заданного количества популяций.

**4. Экспериментальные исследования.** Экспериментальные исследования, проведенные с разным количеством вершин графа, показали, что временная сложность алгоритма полиномиальная  $O(n^2)$ . График временной сложности алгоритма показан на рис. 4.

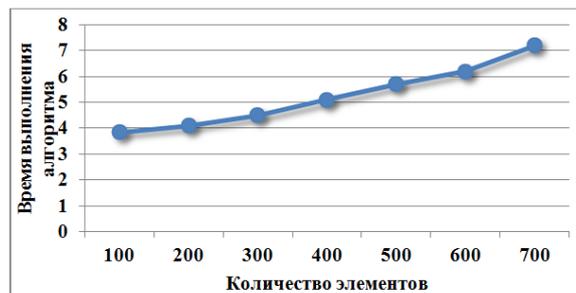


Рис. 4. График временной сложности алгоритма

В табл. 1 показаны результаты вычислительных экспериментов, проведенных с разным количеством вершин и ребер графа. В экспериментах участвовали разработанный генетический алгоритм оценки семантической близости и жадный алгоритм.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов

Граф компонентов триплетов G(X,U)		ЦФ ГА	ЦФ ЖА
Число вершин	Число ребер		
100	70	0,00003985	0,000028
200	90	0,000005893	0,0000042
300	110	0,00000065	0,00000045
400	130	0,0000000123	0,000000011
500	150	0,000000000485	0,00000000026
600	170	0,0000000000458	0,00000000000250
700	190	0,0000000000008523	0,0000000000000569

Как показывает табл. 1, генетический алгоритм в среднем является на 29 % более эффективным, чем жадный алгоритм.

**Заключение.** В XXI веке развитие общества неразрывно связано с развитием информационных технологий. За последние годы существенно увеличился объем генерируемой, передаваемой и обрабатываемой информации. В связи с этим актуальными на сегодняшний день являются задачи поиска новых способов хранения информации, ее представления, формализации и систематизации, а также автоматической обработки. Распространенным методом решения указанных проблем является использование семантики обрабатываемых понятий.

В исследованиях связанных с моделированием естественной языковой семантики особую актуальность приобретают разработки количественных методов измерения семантической информации в языке и в тексте. Одной из важных задач в этой области является расчет семантической близости (или инверсной величины – семантического расстояния) между единицами лексикографической системы (словаря, тезауруса, онтологии).

В статье проанализированы распространенные способы оценки семантической близости на основании иерархических и неиерархических связей. Предложена графовая модель компонентов триплетов онтологий, приведена формула для расчета семантической близости. Разработан генетический алгоритм, работающий с указанной графовой моделью, предложен ряд генетических операторов. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность такого подхода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dorsey P.* Personal knowledge management [e-resource]. – URL: [http://www.360doc.com/content/05/1228/22/2563\\_51065.shtml](http://www.360doc.com/content/05/1228/22/2563_51065.shtml) (дата обращения 16.02.2016).
2. *Martin J.* Personal Knowledge Management. The Basis of Corporate and Institutional Knowledge Management // *Managing Knowledge: Case Studies in Innovation*. – Alberta: University of Alberta, faculty of Extension, 2000. – Vol. 6.
3. *Ландэ Д.В.* Поиск знаний в Internet. – М.: Диалектика, 2005. – 271 с.
4. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kuresitys I.O.* Models for Supporting of Problem-Oriented Knowledge Search and Processing // *Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’16)*. – Vol. 1. – P. 287-295
5. *Kerschberg L., Jeong H., Kim W.* Emergent Semantic in Knowledge Sifter: An Evolutionary Search Agent based on Semantic Web Services. In: Spaccapietra, S., Aberer, K., Cudre-Mauroux, P. (eds.) // *Journal on Data Semantic VI. LNCS*. – 2006. – Vol. 4090. – P. 187-209.
6. *Гончар А.Д.* Сравнительный анализ баз данных и баз знаний (онтологий) применимо к моделированию сложных процессов // *Современные научные исследования и инновации*. – 2014. – № 5. <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34325> (дата обращения: 27.03.2016).
7. *Крюков К.В., Панкова Л.А., Пронина В.А.* Меры семантической близости в онтологии // *Проблемы управления*. – 2010. – № 5. – С. 2-14.
8. *Maedche A., Zacharias V.* Clustering Ontology-Based Metadata in the Semantic Web // *Proceedings PKDD-2002, LNAI 2431*. – 2002. – P. 348-360.
9. *Ле Хаой, Тузовский А.Ф.* Разработка семантических электронных библиотек на основе онтологических моделей // *Труды XV Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» - RCDL 2013* (Ярославль, Россия, 14.10–17.10.2013). – Ярославль: Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, 2013.
10. *Курейчик В.М., Кажаров А.А.* Использование шаблонных решений в муравьиных алгоритмах // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 7 (144). – С. 11-17.
11. *Глазков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В.* Генетические алгоритмы. – М.: Физмат-лит, 2006. – 320 с.
12. *Курейчик В.М.* Особенности построения систем поддержки принятия решений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2012. – № 7 (132). – С. 92-98.
13. *Курейчик В.В., Родзин С.И.* О правилах представления решений в эволюционных алгоритмах // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2010. – № 7 (108). – С. 13-21.
14. *Kureichik V.M., Rodzin S.I.* Evolutionary algorithms: genetic programming // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2002. – Vol. 41, No. 1. – P. 123-132.
15. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V.* Development of Distributed Information Systems: Ontological Approach // *Software Engineering in Intelligent Systems. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015)*. Vol. 3. – Springer International Publishing AG Switzerland, 2015. – P. 113-122.
16. *Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V.* Decision Support Systems for Knowledge Management // *Software Engineering in Intelligent Systems. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015)*. Vol. 3. – Springer International Publishing AG Switzerland, 2015. – P. 123-130.
17. *Kravchenko Y.A., and Kureichik V.V.* Knowledge management based on multi-agent simulation in informational systems // *8th IEEE International Conference “Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014”*. – 2014. – P. 264-267.
18. *Запорожец Д.Ю., Курейчик В.В.* Гибридный алгоритм решения задач транспортного типа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 7 (144). – С. 80-85.

19. Fishwick P.A., Miller J.A. Ontologies for Modeling and Simulation: Issues and Approaches // In Proceedings of, Winter Simulation Conference. – 2004. – P. 259-264.
20. Тузовский А.Ф., Чуриков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии) / под общ. ред. В.З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.

## REFERENCES

1. Dorsey P. Personal knowledge management [e-resource]. Available at: [http://www.360doc.com/content/05/1228/22/2563\\_51065.shtml](http://www.360doc.com/content/05/1228/22/2563_51065.shtml) (accessed 16 February 2016).
2. Martin J. Personal Knowledge Management. The Basis of Corporate and Institutional Knowledge Management, *Managing Knowledge: Case Studies in Innovation*. Alberta: University of Alberta, faculty of Extension, 2000, Vol. 6.
3. Lande D.V. Poisk znaniy v Internet [Search knowledge in the Internet]. Moscow: Dialektika, 2005, 271 p.
4. Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kursityis I.O. Models for Supporting of Problem-Oriented Knowledge Search and Processing, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16)*, Vol. 1, pp. 287-295
5. Kerschberg L., Jeong H., Kim W. Emergent Semantic in Knowledge Sifter: An Evolutionary Search Agent based on Semantic Web Services. In: Spaccapietra, S., Aberer, K., Cudre-Mauroux, P. (eds.), *Journal on Data Semantic VI. LNCS*, 2006, Vol. 4090, pp. 187-209.
6. Gonchar A.D. Sravnitel'nyy analiz baz dannykh i baz znaniy (ontologiy) primenimo k modelirovaniyu slozhnykh protsessov [Comparative analysis of databases and knowledge bases (ontologies) applicable to the modeling of complex processes] *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific researches and innovations], 2014, No. 5. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34325> (accessed 27 March 2016).
7. Kryukov K.V., Pankova L.A., Pronina V.A. Mery semanticheskoy blizosti v ontologii [Measures of semantic closeness in the ontology], *Problemy upravleniya* [Problems of Management], 2010, No. 5, pp. 2-14.
8. Maedche A., Zacharias V. Clustering Ontology-Based Metadata in the Semantic Web, *Proceedings PKDD-2002, LNAI 2431*, 2002, pp. 348-360.
9. Le Khoay, Tuzovskiy A.F. Razrabotka semanticheskikh elektronnykh bibliotek na osnove ontologicheskikh modeley [The development of semantic digital libraries on the basis of ontological models], *Trudy XV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Elektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnye kolleksii» - RCDL 2013 (Yaroslavl', Rossiya, 14.10–17.10.2013)* [Proceedings of the XV all-Russian scientific conference "Electron-related libraries: advanced methods and technologies, digital collections" - RCDL 2013 (Yaroslavl, Russia 14.10–17.10.2013)]. Yaroslavl': Yaroslavskogo gosudarstvenno-go universiteta im. P.G. Demidova, 2013.
10. Kureychik V.M., Kazharov A.A. Ispol'zovanie shablonnykh resheniy v murav'inykh algoritmakh [Template using for ant colony algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 11-17.
11. Gladkova L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 320 p.
12. Kureychik V.M. Osobennosti postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Features of decision making support system design], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 92-98.
13. Kureychik V.V., Rodzin S.I. O pravilakh predstavleniya resheniy v evolyutsionnykh algoritmakh [On the rules for the submission decisions in evolutionary algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 13-21.
14. Kureichik V.M., Rodzin S.I. Evolutionary algorithms: genetic programming, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2002, Vol. 41, No. 1, pp. 123-132.
15. Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V. Development of Distributed Information Systems: Ontological Approach, *Software Engineering in Intelligent Systems. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015)*. Vol. 3. Springer International Publishing AG Switzerland, 2015, pp. 113-122.
16. Bova V.V., Kravchenko Y.A., Kureichik V.V. Decision Support Systems for Knowledge Management, *Software Engineering in Intelligent Systems. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Computer Science On-line Conference 2015 (CSOC2015)*. Vol. 3. Springer International Publishing AG Switzerland, 2015, pp. 123-130.

17. *Kravchenko Y.A., and Kureichik V.V.* Knowledge management based on multi-agent simulation in informational systems, *8th IEEE International Conference "Application of Information and Communication Technologies – AICT 2014"*, 2014, pp. 264-267.
18. *Zaporozhets D.Yu., Kureychik V.V.* Gibridnyy algoritm resheniya zadach transportnogo tipa [Hybrid algorithm solving transport type problems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 80-85.
19. *Fishwick P.A., Miller J.A.* Ontologies for Modeling and Simulation: Issues and Approaches, In *Proceedings of, Winter Simulation Conference*, 2004, pp. 259-264.
20. *Tuzovskiy A.F., Chirikov S.V., Yampol'skiy V.Z.* Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii) [The knowledge management system (methods and technology)], under ed. V.Z. Yampol'skogo. Tomsk: Izd-vo NTL, 2005, 260 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.М. Ошхунов.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Кулиев Эльмар Валерьевич** – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; ассистент.

**Курситыс Илона Олеговна** – e-mail: i.kursitys@mail.ru; тел.: +79518421327; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

**Kuliev Elmar Valerievich** – e-mail: ekuliev@sfedu.ru; the department of computer aided design; assistant.

**Kursitys Iona Olegovna** – e-mail: i.kursitys@mail.ru; phone: +79518421327; the department of computer aided design; post-graduate student.

## Раздел III. Моделирование и проектирование

УДК 658.512.2.011.5

**В.В. Лисяк, Н.К. Лисяк, Д.А. Малуколов**

### О ЗАДАЧЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА САПР НА БАЗЕ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА

*Рассмотрена одна из задач системного уровня проектирования, которая позволяет изучить систему, где клиенты, обращающиеся в случайные моменты времени за услугами и требующие различного времени обслуживания, могут выстраиваться в очереди. Рассмотренные модели дают вероятностные распределения длины очереди, моментов поступления обращений и времен ожидания обслуживания. Эти параметры важны в системах, где потери из-за перегрузки могут быть скомпенсированы лучшей организацией обслуживания. Многообразие ресурсов САПР и сложность их взаимодействия ставят задачу анализа моделей стохастической, сетевой структуры. Стохастические сети представляют достаточно общие случаи взаимодействия ресурсов с разными классами заявок, разными дисциплинами обслуживания и др. Однако в таких моделях сложно описать процессы, в которых задействовано одновременно несколько ресурсов системы. При этом оценка параметров таких систем на этапах их создания выполняется средствами имитационного или аналитического моделирования. Имитационное моделирование позволяет достаточно точно выполнить моделирование системы, но со значительными затратами времени. Аналитическое моделирование даёт приближенные оценки, но за существенно меньшее время. Статья посвящена аналитическому подходу, в котором система рассматривается как модель массового обслуживания. Наиболее важной характеристикой в задаче моделирования таких систем является оценка производительности системы и ее составных частей. Для этого система представляется как модель массового обслуживания, которая описывается с помощью марковского процесса. Аппаратом анализа такого процесса являются уравнения Колмогорова, решение которых и даёт возможность получить выходные параметры производительности системы. Особенностью предлагаемой работы является разработка программных средств, облегчающих инженеру процесс моделирования за счёт автоматизации перехода от графической схемы исследуемого процесса к системе уравнений Колмогорова.*

*Анализ САПР; уравнения Колмогорова; марковский процесс; имитационное моделирование; аналитическая модель; производительность системы; система массового обслуживания; плотность потока требований; относительная пропускная способность системы.*

**V.V. Lisyak, N.K. Lisyak, D.F. Malukolov**

### ON THE STRUCTURAL ANALYSIS OF CAD ON THE BASIS OF MARKOV PROCESS

*There is considered a task of system level of design, which allows studying the system, where the clients request for services at random moments, and require different service time, and can line up in queue. Considered models provide the probability distribution of queue length, moments of requests' receiving, and times of waiting for service. These parameters are important in the systems, where losses caused by overloading can be compensated with better organization problem of stochastic net structure models analysis. Stochastic nets present sufficiently general cases of resources interaction with different classes of service. Variety of CAD resources and complexity of their interaction cause the of requests, different service procedures, etc. However those models are difficult to use for description of processes, which apply to several system resources simultaneously. Estimation*

*of system parameters during systems development is performed by means of simulation and analytical modeling. Simulation provides quite precise system modeling, but requires significant time costs. Analytical modeling provides approximate estimates, but requires essentially less time. This work is dedicated to analytical approach, where system is considered as a queuing model. The most valuable characteristic in such an approach is estimation of system performance and performance of its modules. Therefore system is represented as a queuing model, described by means of Markov process. Instrument of such process analysis is Kolmogorov equations solution, which allows getting output parameters of system performance. Distinction of the proposed work is development of software tools, simplifying modeling process for an engineer due to automation of transition from investigated process flowgraph to Kolmogorov equations system.*

*CAD analysis; Kolmogorov equations; Markov process; simulation modeling; analytical model; system performance; queuing system; requirements flux density; relative system channel capacity.*

**Введение.** САПР состоит из многочисленных компонентов, взаимодействующих в процессе функционирования системы. Все компоненты (устройства ввода-вывода, процессоры, программные модули и т.п.) являются ресурсами. При параллельном решении задач появляются запросы на одновременное использование одного какого-либо ресурса, что порождает конфликтные ситуации. Такие ситуации приводят к задержкам в обработке запросов, появлению очередей и в результате снижают эффективность САПР. Поэтому такие ситуации надо предусматривать на системном уровне разработки САПР [1–6], когда принимаются основные решения по архитектуре будущей САПР.

Многообразие ресурсов и сложность их взаимодействия ставят задачу анализа моделей стохастической, сетевой структуры. При этом использование одной задачей нескольких разнородных ресурсов приводит к одноуровневому или многоуровневому представлению взаимодействия ресурсов [7–10]. В одноуровневом представлении такую задачу упрощают за счёт ввода в модель логических условий и блокировок, либо выделяют какой-либо один из совместно используемых ресурсов, а другие ресурсы либо не учитываются, либо учитываются введением некоторых ограничений. Эти упрощения можно обойти при многоуровневом представлении взаимодействия ресурсов, в котором одновременное занятие заявкой нескольких ресурсов отображается с помощью механизма вложенных процессов. В таком подходе в моделях отдельных уровней отсутствуют сложные логические условия и блокировки, что способствует применению аналитических методов исследования.

Высокая стоимость таких систем требует тщательной проработки структуры программно-технических комплексов и отдельных видов обеспечения. Можно с уверенностью сказать, что единственным способом оценки характеристик таких систем на этапах их создания и эксплуатации является математическое моделирование. Существуют два подхода к моделированию подобных структур: аналитическое моделирование и имитационное. Вряд ли можно отдать предпочтение одному из них. Если имитационное моделирование позволяет достаточно точно промоделировать систему, часто обладающую стохастическими свойствами, то аналитическое позволяет получить приближенные оценки. Однако для проведения многовариантного анализа первое требует значительных затрат времени, в то время как в случае использования аналитических методов требуемое время существенно меньше. Статья посвящена одному из аналитических подходов, при котором система рассматривается как модель в рамках теории массового обслуживания.

**Постановка задачи.** Оценка производительности САПР и ее составных частей необходима для целенаправленного повышения эффективности и качества процесса проектирования на этапах разработки системы и ее эксплуатации. При этом производительность оценивается с целью обоснования и определения наилучших вариантов ее построения, усовершенствования оперативного управления функционированием.

Показателями производительности являются параметры (индексы) производительности, характеризующие всю САПР или какие-то ее составные части. Параметры производительности САПР в значительной мере определяются составом и организацией совокупности технических средств и программного обеспечения, называемой программно-техническим комплексом. Программно-технический комплекс в числе прочих требований должен обеспечивать следующее: производительность ЭВМ, достаточную для решения всех проектных задач; возможность оперативного взаимодействия проектировщика с ЭВМ в процессе автоматизированного проектирования; приемлемое для проектировщика время реакции системы на его запросы; высокую надежность функционирования; открытость ПТК для реконфигураций и дальнейшего развития [4–6].

В связи с этим необходимы методы и средства, позволяющие оценивать параметры, на основании которых можно судить о соответствии ПТК САПР поставленным требованиям.

Наибольший интерес представляют такие параметры системы как производительность (пропускная способность) проектируемой системы, продолжительность обслуживания (задержки) заявок в системе, эффективность используемого в системе оборудования.

При проектировании САПР на системном уровне, анализ процессов функционирования системы связан с исследованием прохождения через систему потока заявок. Очевидно, что параметры заявок, поступающих в систему, являются случайными величинами и при проектировании могут быть известны лишь законы их распределений. Поэтому анализ функционирования на системном уровне, как правило, носит статистический характер. В качестве математического аппарата моделирования удобно применять теорию массового обслуживания, а в качестве моделей систем на этом уровне использовать системы массового обслуживания (СМО) [10, 13–16]. Так как интервалы между последовательными событиями каждого потока в системе представляют собой независимые случайные величины, имеющие экспоненциальное распределение, т.е. все потоки событий, изменяющих состояния системы являются пуассоновскими, то модель называется марковской и изменение ее состояния можно описать с помощью марковского процесса. Аппарат анализа марковских процессов – уравнения Колмогорова, решение которых является основой для расчета выходных параметров систем обслуживания [17–20, 22–24]. Получение уравнения Колмогорова основано на рассмотрении всех возможных путей перехода системы из начального состояния в другое фиксированное состояние через все возможные промежуточные состояния. Целью данной работы является создание программы выполняющей синтез уравнения Колмогорова.

**Алгоритм синтеза уравнений.** Время реакции системы на запрос включает в себя задержки в очередях, связанные со случайным характером поступления запросов в систему, случайными маршрутами прохождения запросов в систему, случайными временами их обработки отдельными ресурсами. Математический аппарат, позволяющий строить модели, связанные с процессами образования очередей разрабатывается в теории массового обслуживания. Модели, изучаемые в рамках этой теории, называются системами массового обслуживания. События в таких системах представляют собой моменты изменения состояний элементов системы. Если все потоки событий, изменяющих состояний системы пуассоновские, то модель называется марковской, так как ее состояния во времени можно описать с помощью марковского процесса [7, 8, 20]. Аппарат анализа марковских процессов – уравнения Колмогорова. Их решение является основой для расчета выходных параметров систем обслуживания. Получение уравнения Колмогорова основано на рассмотрении всех возможных путей перехода системы из начального состояния в другое фиксированное состояние через все возможные промежуточные состояния. Обозначим через  $S$  состояния системы. Возможны следующие состояния системы:

$S_0$  – состояние, когда все каналы свободны;  
 $S_i$  – состояние, когда занято  $i$  каналов ( $1 \leq i \leq m$ );  
 $S_{m+r}$  – состояние, когда заняты все  $m$  каналов, а  $r$  требований находятся в очереди ( $r \geq 0$ ).

Если на длину очереди не накладывается ограничений, то  $r$  может быть сколь угодно большим и система имеет потенциально неограниченное число состояний. Пренебрегая возможностью «перескока» системы через состояние за сколь угодно малое время  $\Delta t$  (в силу ординарности простейшего потока вероятность такого события пренебрежимо мала), можно считать, что система через время  $\Delta t$  либо останется в прежнем состоянии, либо перейдет в соседнее.

Обозначим через  $p_i(t)$  вероятность того, что в момент времени  $t$  система находится в состоянии  $S_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ). Очевидно, для любого момента времени  $t$  сумма вероятностей состояний равна 1 (нормировочное условие):  $\sum p_i(t) = 1$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ , так как события состоящие в том, что в момент времени  $t$  система находится в состояниях  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , несовместны и образуют полную группу событий. Задача состоит в том, чтобы определить вероятность состояний  $p_0(t), p_1(t), \dots, p_n(t)$  как функций времени.

Марковский процесс описывается относительно вероятностей  $p_i(t)$  системой дифференциальных уравнений, называемых уравнениями Колмогорова. При составлении этих уравнений удобно воспользоваться графом состояний, вершины которого – состояния, а дуги – возможные переходы из одного состояния в состояние. Для рассматриваемой СМО граф состояний будет иметь следующий вид (рис. 1).

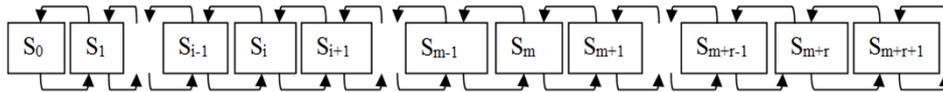


Рис. 1. Граф состояний СМО

На практике уравнения Колмогорова выписывают формально, исходя из структуры графа переходов марковской системы. Вершины этого графа соответствуют состояниям, стрелки показывают направления переходов, веса над стрелками соответствуют интенсивностям переходов (рис. 2).

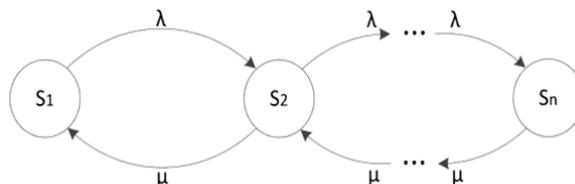


Рис. 2. Граф переходов

Для записи уравнений Колмогорова используют следующее формальное правило. В левой части уравнения стоит производная вероятности нахождения системы в одном из состояний, а правой части находится столько членов, сколько стрелок (переходов) связано с данным состоянием. Если стрелка направлена из состояния, то соответствующий член имеет знак минус, если в состояние – плюс. Каждый член равен интенсивности перехода, отвечающей данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка. Эти члены называют компонентами потока состояний.

Требования к алгоритму. К разрабатываемому алгоритму предъявляются следующие требования:

- ◆ получение уравнения в общем виде СМО;
- ◆ частный случай – чистая СМО с ожиданием;
- ◆ частный случай – СМО с отказами;
- ◆ частный случай – СМО с конечной длиной очереди.

Входными параметрами алгоритма являются:

- ◆ граф переходов состояний исследуемой системы;
- ◆ плотности перехода в старшее и в младшее состояния системы;
- ◆ интенсивность ухода из очереди;
- ◆ максимальная длина очереди.

Выходные данные алгоритма:

- ◆ параметры переходов между состояниями системы;
- ◆ синтезированная система уравнений Колмогорова;
- ◆ решение системы уравнений;
- ◆ вычисленные выходные параметры исследуемой системы.

Укрупнённая структурная схема алгоритма представлена на рис. 3.

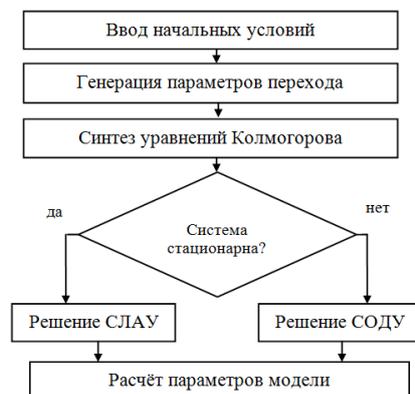


Рис. 3. Общая схема алгоритма

В начале работы алгоритма выполняется ввод необходимых для синтеза уравнений условий. Затем происходит генерация параметров переходов между состояниями системы. Для всех переходов системы в старшее состояние  $S_1$  устанавливается плотность задаваемая пользователем без каких-либо изменений, т.к. поток событий - без последствий, т.е. вероятность появления новой заявки не зависит от момента времени появления предыдущей заявки, а значит, плотность перехода в старшее состояние постоянна для всей системы. Плотность переходов в младшее состояние  $S_2$  зависит от количества занятых каналов обслуживания. Если все каналы свободны, то плотность перехода равна заданной пользователем, в случае, если  $n$  из  $m$  каналов заняты, интенсивность обслуживания увеличивается в  $n$  раз. Т.к. заявки могут покинуть очередь и вероятность этого события увеличивается с размером очереди, то можно считать, что интенсивность ухода увеличивается на  $v(i - m)$ , где  $v$  – интенсивность ухода из очереди,  $m$  – количество каналов.

Затем синтезируется система уравнений. В левой части каждого уравнения стоит производная вероятности соединения, а в правой части находится столько членов, сколько переходов (стрелок) связано с данным состоянием (рис. 3). Если стрелка направлена из состояния, то соответствующий член имеет знак минус,

если в состояние – знак плюс. Каждый член равен интенсивности перехода, отвечающей данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого исходит данная стрелка.

Полученная система уравнений решается методом Рунге-Куты четвертого порядка, либо, в случае, если система стационарна – методом Зейделя.

Далее выполняется расчет следующих параметров анализируемой системы:

- ◆ приведённая плотность потока требований, т.е. среднее число требований, поступающих за среднее время обслуживания одного требования  $a = \lambda/\mu$ , где  $\lambda$  – плотность перехода в старшее состояние,  $\mu$  – плотность перехода в младшее состояние;
- ◆ приведённая плотность потока уходов из очереди (без обслуживания)  $b = v/\mu$ , где  $v$  – интенсивность ухода заявок из очереди;
- ◆ средняя длина очереди определяется как математическое ожидание числа находящихся в очереди требований, т.е.

$$r_{cp} = \sum_{r=1}^{\infty} r P_{m+r} = \frac{a^m}{m!} \sum_{r=1}^{\infty} r \frac{a^r P_0}{\prod_{j=1}^r (m + jb)},$$

где  $r \geq 1$  – длина очереди,  $j = \overline{1, r}$ ;

- ◆ относительная пропускная способность  $q = (\lambda - vr_{cp})/\lambda = 1 - (v - r_{cp})/\lambda$ ;
- ◆ среднее число занятых каналов  $k_{cp} = (\lambda - vr_{cp})/\mu = a - br_{cp}$ .

#### Программная реализация

На рис. 4 представлено основное окно программы.

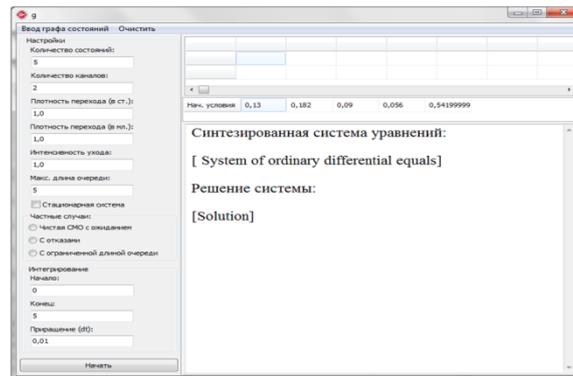


Рис. 4. Основное окно программы

В левой части главного окна расположены поля ввода следующих параметров системы:

- ◆ количество состояний системы;
- ◆ количество каналов;
- ◆ плотность перехода в старшее состояние;
- ◆ плотность перехода в младшее состояние;
- ◆ интенсивность ухода из очереди;
- ◆ максимальная длина очереди.

Также в левой нижней части окна расположены поля ввода параметров решения системы:

- ◆ начало интегрирования;
- ◆ конец интегрирования;
- ◆ шаг интегрирования.

В верхней части программы расположена таблица, в которой отображаются рассчитываемые параметры ребер графа перехода – плотности переходов между состояниями системы. Под ним расположено поле, в котором задаются начальные условия интегрирования для решения системы уравнений.

Состояния системы могут задаваться графически. Для вызова окна графического ввода требуется выбрать соответствующий пункт в главном меню программы. В данном окне также предусмотрены средства редактирования вводимого графа (удаление вершин, ребер).

После ввода всех необходимых данных, осуществляется расчет параметров связей, синтез уравнений. Результаты этих действий немедленно отображаются в текстовом поле в центре окна. Далее автоматически происходит решение синтезированных уравнений и расчет выходных параметров системы.

После ввода требуемых параметров, по нажатию соответствующей кнопки, осуществляется расчет параметров системы, синтез уравнений Колмогорова. Строится график с решением уравнений, результаты работы программы выводятся в специальное поле в центре окна программы (рис. 5, 6).

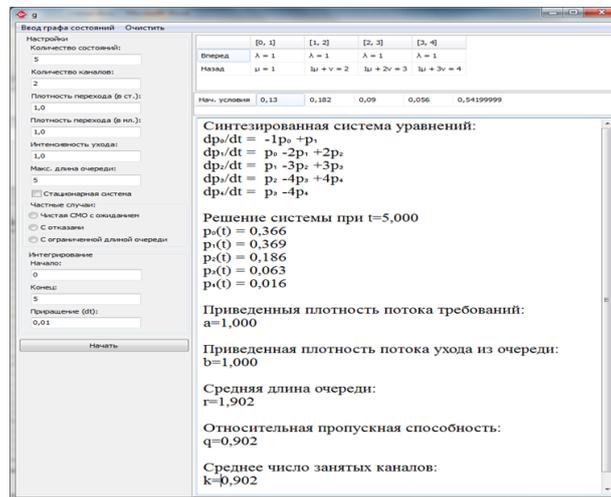


Рис. 5. Результат работы программы

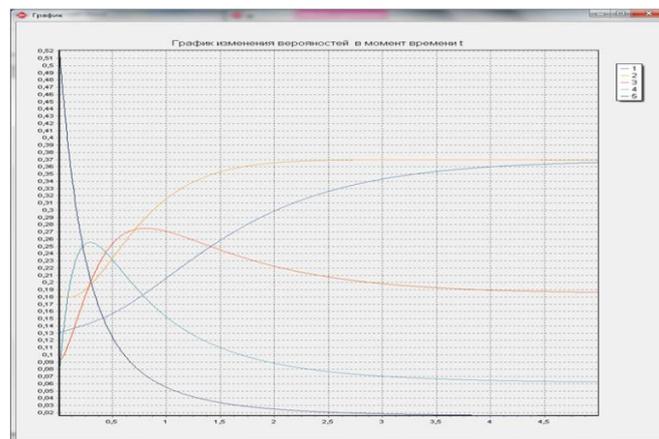


Рис. 6. График изменений вероятностей

Условия использования программы. При работе с программой на входные данные налагаются следующие ограничения:

- ◆ количество состояний системы не должно превышать 100;
- ◆ плотности вероятностей переходов системы, интенсивность ухода из очереди должны изменяться в интервале от 0.001 до 100;
- ◆ максимальная длина очереди до 9999;
- ◆ начало и конец интегрирования – вещественные числа от 0 до 9999;
- ◆ шаг интегрирования – вещественное число от 0.0001 до 1.

Для получения искомого результата при работе с программой требуется выполнить следующую последовательность действий:

1. Запустить программу в среде, удовлетворяющей системным требованиям.
2. В случае графического ввода графа вызвать соответствующее окно через главное меню программы. Ввод состояний осуществляется кликом левой кнопки мыши в поле ввода в центральной части окна. Для ввода ребер графа требуется навести указатель на граф, нажать и удерживать нажатой левую кнопку мыши, перевести указатель на другую вершину графа и отпустить кнопку. После ввода графа следует закрыть окно. Если графический ввод не требуется, нужно просто указать количество состояний графа в поле ввода на главном окне программы.
3. Ввести плотности вероятности перехода в старшее и младшее состояния системы и, если требуется, интенсивность потока из очереди и максимальную длину очереди.
4. Выбрать один из частных случаев СМО в соответствующем поле.
5. Если исследуемая система является стационарной, следует установить флаг в соответствующем пункте в левой части главного окна программы.
6. Ввести параметры интегрирования системы (начало, конец, приращение).
7. Нажать кнопку «Начать». При этом произойдет расчет параметров переходов, синтез уравнений, их решение, подсчет параметров исследуемой системы. Все результаты работы будут выведены в тестовое поле в центральной части главного окна программы.

Пример использования программы. Для примера рассмотрим вычислительную систему, имеющую 2 блока. Пусть пакеты, требующие обработки, приходят с частотой два пакета в секунду. В среднем система обрабатывает 6 пакетов в секунду.

Найдем выходные параметры системы.

Ограничим количество состояний системы семью. Тогда граф системы имеет вид, где  $\lambda=2$  – интенсивность потока требований (2 пакета в секунду);  $\mu=6$  – интенсивность обслуживания (6 пакетов в секунду).

Возможны следующие состояния системы обслуживания:

$S_0$  – пакетов на обработку нет;

$S_1$  – 1 вычислительный блок занят;

$S_2$  – 2 вычислительных блока заняты;

$S_i$  – в системе  $i$  пакетов, два из них обрабатываются, а  $(i-2)$  стоят в очереди ( $i=3, 4, 5, 6$ ).

Введем исходные данные в соответствующие поля программы, настроим параметры интегрирования: в поле «начало» введем 0, в поле «конец» – 5, «приращение» – 0.01.

После нажатия «Начать» синтезирована следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -2p^0 + 6p^1; \\ \frac{dp_1}{dt} = 2p^0 - 8p^1 + 12p^2; \\ \frac{dp_2}{dt} = 2p^1 - 14p^2 + 12p^3; \\ \frac{dp_3}{dt} = 2p^2 - 14p^3 + 12p^4; \\ \frac{dp_4}{dt} = 2p^3 - 14p^4 + 12p^5; \\ \frac{dp_6}{dt} = 2p^5 - 12p^6. \end{cases}$$

Решение системы при  $t=5,000$ :

$$\begin{cases} p_0(t) = 0,714; \\ p_1(t) = 0,238; \\ p_2(t) = 0,040; \\ p_3(t) = 0,007; \\ p_4(t) = 0,001; \\ p_5(t) = 0,000; \\ p_6(t) = 0,000. \end{cases}$$

Вычисленные параметры системы представлены в следующей таблице.

Приведенная плотность потока требований	$a=0,333$
Средняя длина очереди	$r=0,190$
Относительная пропускная способность системы	$q=1,000$
Среднее число занятых вычислительных блоков	$k=0,333$

Программа выводит также график изменения вероятностей нахождения системы в одном из состояний (рис. 7).

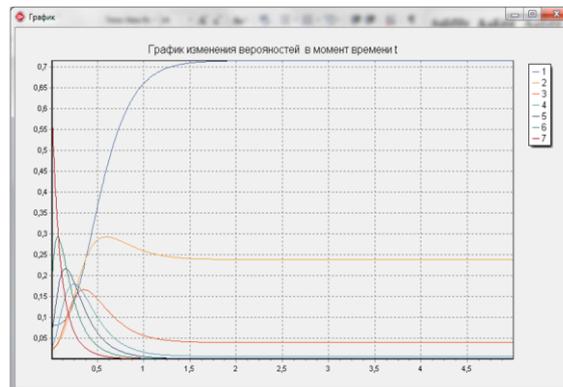


Рис. 7. График изменения вероятностей

**Заключение.** В целом по работе можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрена задача системного уровня проектирования САПР, в частности, задача структурного моделирования САПР, в которой основным моментом является оценка производительности САПР. Такая оценка необходима для целенаправленного повышения эффективности и качества процесса проектирования на этапе разработки системы. Показывается, что параметры, по которым можно судить о производительности, могут быть получены аналитически на базе использования марковского процесса, а аппаратом анализа такого процесса являются уравнения Колмогорова, решение которых и дает возможность получить выходные параметры производительности системы.

2. Новизной предлагаемой работы является предложение автоматизировать переход от графа-схемы состояний и переходов марковского процесса к системе уравнений Колмогорова, решение которой позволяет получить такие параметры системы как приведенная плотность потока требований, средняя длина очереди, относительная пропускная способность системы, среднее число занятых вычислительных блоков и др.
3. Предлагаемые результаты работы в виде разработанной и протестированной программы позволяют сократить время и упростить для пользователя процесс структурного моделирования САПР, а также использовать предлагаемую программу для эффективного усвоения в учебном процессе материала по дисциплинам связанным с разработкой не только САПР, но и других сложных информационных систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лисяк В.В., Лисяк Н.К.* Введение в разработку САПР электронной аппаратуры. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 78 с.
2. *Лисяк В.В., Лисяк Н.К.* Методики разработки и основы моделирования САПР. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 94 с.
3. *Lisyak V.V., Lisyak N.K.* Modelling of CAD productivity // Proceedings of the International Scientific Conferences «Intelligent Systems» (ATS'08) and «Intelligent CAD» (CAD – 2008). – Moscow: Physmathlit, 2008. – Vol. 4. – P. 16-24.
4. *Лисяк В.В., Лисяк Н.К.* О задаче анализа производительности САПР // Известия ТРТУ. – 2007. – № 1 (73). – С. 118-124.
5. *Кузовлев В.И., Шкатов П.Н.* Математические методы анализа производительности и надёжности САПР. – М.: Высшая школа, 1990. – 143 с.
6. *Лисяк В.В., Лисяк Н.К.* Анализ многоресурсных моделей САПР // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 12 (101). – С. 86-92.
7. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1988. – 480 с.
8. *Сигорский В.П.* Математический аппарат инженера. – Киев: Техніка, 1975. – 765 с.
9. *Клейнрок Л.* Вычислительные сети с очередями. – М., 1979. – 221 с.
10. *Жожикашвили В.А., Вишневецкий В.М.* Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. – М., 1988. – 193 с.
11. *Курейчик В.М., Курейчик В.В., Гладков Л.А.* Генетические алгоритмы. – Ростов-на-Дону: РостИздат, 2004. – 400 с.
12. *Малюх В.Н.* Введение в современные САПР. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
13. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 2005. – 343 с.
14. *Кельберт М.Я., Сухов Ю.М.* Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. – М.: МЦНМО, 2009. – 295 с.
15. *Taha Хемди А.* Введение в исследование операций. – 7-е изд.: пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
16. *Sheldon M. Ross.* Introduction to Probability Models, Tenth Edition. – Academic Press, 2009.
17. *Hillier F.* Introduction to Operations Research. McGraw-Hill Science. – 9th edition, 2009.
18. *Olive Ibe.* Markov Processes for Stochastic Modeling. Academic Press 2008. Chapter 5.
19. *Шелухин О.И., Тенякиев А.М., Осин А.В.* Моделирование информационных систем: Учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
20. *Дворецкий С.И., Муромцев Ю.Л., Погонин В.А.* Моделирование систем: учебник для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2009. – 320 с.
21. [Электронный ресурс]: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Система\\_массового\\_обслуживания](http://ru.wikipedia.org/wiki/Система_массового_обслуживания) (дата извлечения: 20.04.2013).
22. [Электронный ресурс]: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Теория\\_массового\\_обслуживания](http://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_массового_обслуживания) (дата извлечения: 25.04.2013).
23. [Электронный ресурс]: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Марковские\\_процессы](http://ru.wikipedia.org/wiki/Марковские_процессы) (дата извлечения: 25.04.2013).
24. [Электронный ресурс]: [http://ru.wikipedia.org/wiki/цепь\\_Маркова](http://ru.wikipedia.org/wiki/цепь_Маркова) (дата извлечения: 22.04.2013).

## REFERENCES

1. *Lisyak V.V., Lisyak N.K.* Vvedenie v razrabotku SAPR elektronnoy apparatury [Introduction to the design CAD electronic equipment]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, 78 p.
2. *Lisyak V.V., Lisyak N.K.* Metodiki razrabotki i osnovy modelirovaniya SAPR [Techniques for the design and CAD modeling framework]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, 94 p.
3. *Lisyak V.V., Lisyak N.K.* Modelling of CAD productivity, *Proceedings of the International Scientific Conferences «Intelligent Systems» (ATS'08) and «Intelligent CAD» (CAD – 2008)*. Moscow: Phymathlit, 2008, Vol. 4, pp. 16-24.
4. *Lisyak V.V., Lisyak N.K.* O zadache analiza proizvoditel'nosti SAPR [On the problem of the analysis of CAD productivity], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2007, No. 1 (73), pp. 118-124.
5. *Kuzovlev V.I., Shkatov P.N.* Matematicheskie metody analiza proizvoditel'nosti i nadezhnosti SAPR [Mathematical methods for the analysis of the performance and reliability of the CAD]. Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 143 p.
6. *Lisyak V.V., Lisyak N.K.* Analiz mnogoresursnykh modeley SAPR [Analysis of multiresource CAD models], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2009, No. 12 (101), pp. 86-92.
7. *Ventsel' E.S., Ovcharov L.A.* Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya [Theory of Probability and its engineering applications]. Moscow: Nauka. Gl. red. Fiz.-mat. lit., 1988, 480 p.
8. *Sigorskiy V.P.* Matematicheskiy apparat inzhenera [Mathematical Engineer apparatus]. Kiev: Tekhnika, 1975, 765 p.
9. *Kleyurok L.* Vychislitel'nye seti s ocheredyami [Computer networks with queues]. Moscow, 1979, 221 p.
10. *Zhozhiashvili V.A., Vishnevskiy V.M.* Seti massovogo obsluzhivaniya. Teoriya i primeneniye k setyam EVM [Queueing Networks. The theory and application to computer networks]. Moscow, 1988, 193 p.
11. *Kureychik V.M., Kureychik V.V., Gladkov L.A.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Rostov-on-Don: RostIzdat, 2004, 400 p.
12. *Malyukh V.N.* Vvedenie v sovremennyye SAPR [Introduction to modern CAD]. Moscow: DMK Press, 2010, 192 p.
13. *Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A.* Modelirovaniye sistem [Modeling systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 343 p.
14. *Kel'bert M.Ya., Sukhov Yu.M.* Markovskie tsepi kak otpravnyaya tochka teorii sluchaynykh protsessov i ikh prilozheniya [Markov chain as the starting point of the theory of random processes and their applications]. Moscow: MTsNMO, 2009, 295 p.
15. *Takha Khemdi A.* Vvedenie v issledovaniye operatsiy [Introduction to Operations Research]. 7th ed.: translation from English. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2005, 912 p.
16. *Sheldon M. Ross.* Introduction to Probability Models, Tenth Edition. Academic Press, 2009.
17. *Hillier F.* Introduction to Operations Research. McGraw-Hill Science. 9th edition, 2009.
18. *Olive Ibe.* Markov Processes for Stochastic Modeling. Academic Press 2008. Chapter 5.
19. *Shelukhin O.I., Tenyakshev A.M., Osin A.V.* Modelirovaniye informatsionnykh sistem: Uchebnoye posobie [Modeling of information systems: tutorial]. Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p.
20. *Dvoretzkiy S.I., Muromtsev Yu.L., Pogonin V.A.* Modelirovaniye sistem: uchebnik dlya vuzov [Modeling systems: A Textbook for high schools]. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2009, 320 p.
21. [Electronic resource]. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Queueing system](http://ru.wikipedia.org/wiki/Queueing_system) (accessed 20 April 2013).
22. [Electronic resource]. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Queueing theory](http://ru.wikipedia.org/wiki/Queueing_theory) (accessed 25 April 2013).
23. [Electronic resource]. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Markov Processes](http://ru.wikipedia.org/wiki/Markov_Processes) (accessed 25 April 2013).
24. [Electronic resource]. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Markov Chain](http://ru.wikipedia.org/wiki/Markov_Chain) (accessed 22 April 2013).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

**Лисяк Владимир Васильевич** – Южный федеральный университет; e-mail: v-lisyak@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634360524; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Лисяк Наталия Константиновна** – e-mail: NKL2004@mail.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Малуколов Дмитрий Алексеевич** – СВОСС; e-mail: Ya280158358@yandex.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Октябрьская, 19; системный архитектор.

**Lisyak Vladimir Vasilievich** – Southern Federal University; e-mail: v-lisyak@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360524; the department of computer aided design; associate professor.

**Lisyak Natalia Konstantinovna** – e-mail: NKL2004@mail.ru; the department of computer aided design; associate professor.

**Malukolov Dmitriy Alekseevich** – СВОСС; e-mail: Ya280158358@yandex.ru; 19, Oktyabrskaya street, Taganrog, 347900, Russia; senior software engineer.

УДК 623.2.045.772.12

**С.Н. Щеглов**

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ, ИНСПИРИРОВАННЫХ ПРИРОДНЫМИ СИСТЕМАМИ, ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ САПР\***

*Представлен процесс разработки алгоритмов, инспирированных природными системами, для эффективного принятия решения в задачах САПР. В последнее время началось исследование возможностей применения и разработка алгоритмов, инспирированных природными системами, для эффективного принятия решения в задачах САПР. При этом постоянно возникает конфликт между сложностью САПР и требованиями принятия эффективных решений в реальном масштабе времени. Данные проблемы не могут быть полностью решены распараллеливанием процесса принятия решений, увеличением числа операторов, пользователей и ЛПП. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является использование новых технологий на стыке информатики, бионики и автоматизации проектирования. В этой связи разработка новых принципов и подходов принятия эффективных решений в задачах проектирования и управления имеет важное экономическое значение и является, в настоящее время, актуальной и важной. Цель исследования – оценка возможности применения интегрированных методов, инспирированных природными системами, для решения задач конструкторского проектирования САПР на примере использования алгоритма поведения стаи серых волков в живой природе. Приведена постановка задачи размещения элементов схем ЭВА на множестве заданных позиций дискретного рабочего поля. Представлена модифицированная технология разработки инспирированных природой алгоритмов. Показана упрощенная схема интегрированного поиска для решения задачи размещения элементов схем электронно-вычислительной аппаратуры. Приведены требования, предъявляемые к построению алгоритмов проектирования, на основе инспирированных природой методов. Показаны основные шаги работы алгоритма поведения стаи серых волков применительно к задаче размещения. Приведены сравнительные результаты вычислительных экспериментов.*

*Управление; автоматизация проектирования; модель; алгоритм; оптимум; вычислительные эксперименты; графовые модели; принятие решений; поиск; система.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-06415).

S.N. Shcheglov

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS INSPIRED BY NATURAL SYSTEMS, FOR EFFECTIVE DECISION-MAKING TASKS CAD

*The paper presents the process of developing algorithms inspired by natural systems, for effective decision-making in problems of CAD. Recently started research of possibilities of application and development of algorithms inspired by natural systems, for effective decision-making in problems of CAD. Constantly there is a conflict between the complexity of CAD and the requirements of making effective decisions in real time. These problems cannot be completely solved by parallelization of the decision-making process, increase in the number of operators, users and decision makers. One possible approach to solving this problem is the use of new technologies at the intersection of computer science, bionics and computer aided design. In this regard, the development of new principles and approaches for making effective decisions in the design and control has important economic and social significance and is currently relevant and important. The purpose of the study is to assess the possibility of using integrated methods, inspired by natural systems, for solving problems of engineering design CAD on the example of use of algorithm of behavior of the pack of grey wolves in nature. Given the formulation of the problem of placing circuit elements of EVA on the set of the set of discrete positions of the working field. Presents a modified technology development of nature inspired algorithms. Shows a simplified diagram of an integrated search for solving a location of the circuit elements of computer and electronic hardware. Given the requirements for the construction of algorithms design, based on nature inspired techniques. Shows the main steps of the algorithm behavior of the pack of grey wolves in the context of accommodation. The comparative results of computational experiments.*

*Management; design automation; model; algorithm; optimum; computational experiments; graph models; decision making; search; system.*

**Введение.** В настоящее время в процессе разработки современных интеллектуальных информационных систем особое внимание уделяется использованию новых гибридных технологий, позволяющих эффективно работать с нечеткой или неполной входной информацией в процессе выработки и принятия решений применительно к различным задачам оптимизации и управления. Это особенно актуально в высокотехнологичных областях, например, связанных с внедрением биоинспирированных, информационных, ядерных и нанотехнологий, новых систем автоматизации проектирования и управления. В связи с этим широкое применение получили стохастические поисковые алгоритмы оптимизации, которые в разных публикациях называют поведенческими, интеллектуальными, метаэвристическими, инспирируемые (вдохновленные) природой, роевыми, многоагентными, популяционными и т.д. [1–3]. В данной работе показан интегрированный подход, основанный на применении ИП-алгоритмов, для решения задач конструкторского проектирования САПР. В качестве примера представлен алгоритм решения задачи размещения при проектировании СБИС, на основе поведения стаи серых волков.

**Цель исследования.** Применение методов моделирования эволюции в системах проектирования и управления позволяет закреплять эффективные решения, полученные на предварительных этапах и использовать их в последующих итерациях. Вся природа эволюции устроена так, что в ней действуют принципы оптимизации, экономии и ускорения. Эволюция невозможна без смены одного устойчивого состояния системы другим, без конкуренции, без конфликтов. В этом случае трудоемкость получения приемлемых решений резко возрастает, возникает проблема «проклятия размерности», и использовать NP-полные, NP-трудные и алгоритмы с экспоненциальной временной сложностью становится невозможным из-за необходимости обработки огромных массивов информации. Тогда становится необходимой интеграция биоинспирированных и поисковых методов с целью модернизации СППР в автоматизированном проектировании. Одним из таких подходов является использование методов моделирования эволюции, применение био-

инспирированных, бионических, квантовых и генетических алгоритмов, эволюционных стратегий, адаптации и взаимодействия с внешней средой. Адаптация позволяет накапливать и использовать информацию, создавать базы знаний и хранилища данных, осуществлять поиск и извлечение знаний при первоначальной неопределенности и изменяющихся внешних условиях.

В последнее время началось исследование возможностей применения и разработка алгоритмов, инспирированных природными системами, для эффективного принятия решения в задачах САПР. При этом постоянно возникает конфликт между сложностью САПР и требованиями принятия эффективных решений в реальном масштабе времени. Данные проблемы не могут быть полностью решены распараллеливанием процесса принятия решений, увеличением числа операторов, пользователей и ЛПП. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является использование новых технологий на стыке информатики, бионики и автоматизации проектирования. По мнению автора, одна из таких технологий может базироваться на идеях моделирования эволюции и методах, инспирированных природными системами [1–9].

В этой связи разработка новых принципов и подходов принятия эффективных решений в задачах проектирования и управления имеет важное экономическое и социальное значение и является, в настоящее время, актуальной и важной.

Цель исследования – оценка возможности применения интегрированных методов, инспирированных природными системами, для решения задач конструкторского проектирования САПР на примере использования алгоритма поведения стаи серых волков в живой природе.

**1. Постановка задачи.** Пусть дано множество конструктивных элементов (блоков), связанных между собой в соответствии с принципиальной схемой узла. Требуется разместить элементы на некотором плоском коммутационном поле (КП) так, чтобы выполнялись все ограничения на взаимное расположение элементов, а некоторый функционал достигал экстремального значения. Структура задачи размещения элементов задается посредством ограничений пространства размещения (габариты кристалла, конкретного корпуса или монтажной платы), характеристик элементов размещения, а также множеством цепей, соединяющих данные элементы. Главные метрические критерии задачи размещения: суммарная длина межсоединений и площадь области размещенных элементов и межсоединений, длина задержки сигналов, энергосбережение, а также их производные [2–5]. Основной целью решения задачи размещения следует считать создание наилучших условий для последующей трассировки.

Представление устройства в виде совокупности блоков разного уровня определяет формальную структурную модель, в которой каждый блок содержит блоки нижних уровней. Такой иерархический подход позволяет снизить временную сложность задач автоматизированного проектирования, разбивая её на подзадачи меньшей размерности. Таким образом, иерархическое деление позволяет организовать описание и хранение данных, при котором конструкторско-технологические ограничения не нарушаются [6–9].

При построении целевой функции (ЦФ) размещения будем использовать единый функционал на основе аддитивных и мультипликативных критериев.

В общем виде задачу размещения неформально можно представить следующим образом. Дано множество элементов, находящихся в отношении связности, в соответствии с принципиально-электрической схемой создаваемого объекта. Требуется разместить элементы внутри коммутационного пространства, таким образом, чтобы заданная целевая функция достигала локального или оптимального значения [1, 2, 7].

На прямоугольную конструкцию накладывается декартова система координат с осями  $s$  и  $t$ , определяющая граф  $G_r$ , представляющий собой координатную решетку.

Задача размещения сводится  $G_r$  к отображению заданного графа-модели  $G=(X,U)$  схемы в решетку таким образом, чтобы множество вершин  $X=\{x_i\}$ ,  $i=1..n$ , графа  $G_r$  размещалось в узлах решетки, число которых конечно, а также соблюдался интегрированный критерий  $Compl(G)$ , представляющий собой интегрированную ЦФ [1, 2, 7, 9]:

$$\begin{cases} Compl(G) = Compl\_Kr(G), & \text{если } N\_Kr > 0 \text{ и } N\_GA = 0; \\ Compl(G) = L\_GA(G), & \text{если } N\_Kr = 0 \text{ и } N\_GA > 0; \\ Compl(G) = \alpha L\_GA(G) + \beta Compl\_Kr(G), & \text{если } N\_Kr > 0 \text{ и } N\_GA > 0, \end{cases}$$

где  $L\_Kr(G)$  – длина критических связей;  $L\_GA(G)$  – величина суммарной длины соединений;  $L\_Dr(G)$  – суммарная длина задержек на КС;  $L\_Er(G)$  – суммарное электропотребление на КС (оно связано с суммарной площадью областей, занятых цепями КС);  $N\_Kr > 0$  и  $N\_GA = 0$  – условие оптимизации ЦФ, основанное на соблюдении критерия длин критических связей;  $N\_Kr = 0$  и  $N\_GA > 0$  – условие оптимизации ЦФ, основанное на выполнении критерия суммарной длины соединений;  $N\_Kr > 0$  и  $N\_GA > 0$  – условие оптимизации ЦФ, основанное на одновременном соблюдении критериев длин критических связей и суммарной длины соединений;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты полезности вышеуказанных критериев, которые определяются на основании конструкторского опыта или экспертных оценок;  $Compl\_Kr(G)$  – комплексный критерий оценки качества размещения определяется формулой:

$$Compl\_Kr(G) = W_1 L\_Kr(G) + W_2 L\_GA(G) + W_3 L\_Dr(G) + W_4 L\_Er(G).$$

Коэффициенты  $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$  и определяются на основе нечеткого множества  $\{0,1\}$ .

Требование оптимизации:  $Compl\_Kr(G) \rightarrow \min$ , т.е. необходимо, чтобы весовая функция была наименьшей для всевозможных способов отождествления вершин графа и узлов решетки. Приведенные критерии косвенно связаны с критерием суммарной длины соединений. Они получили распространение в существующих эвристиках размещения. При использовании этих критериев происходит учет тепловой и электромагнитной совместимости элементов, повышается эффективность упаковки, трассировки и сжатия области коммутационного пространства.

Использование комплексного критерия при разработке алгоритмов размещения позволяет повысить качество полученной конструкции за счет учета реальных знаний эксперта–конструктора. Это связано с тем, что основной задачей размещения элементов является получение конструкции не только с минимальной длиной соединений, но и с созданием условий для последующих этапов трассировки соединений, сжатия и верификации.

**2 Модифицированная технология ИПА.** В СППР при автоматизированном конструкторском проектировании эффективны различные стратегии, концепции, методы, механизмы. В задачах размещения любое альтернативное решение представляется набором параметров  $x_i$ , представляющих один элемент некоторого множества альтернативных решений. Поиск решений в случайно выбранном направлении часто не приводит к квазиоптимальному реальному решению. В этой связи наиболее интересной является модифицированная технология ИПА (инспирированные природой алгоритмы), приведенная на рис. 1.

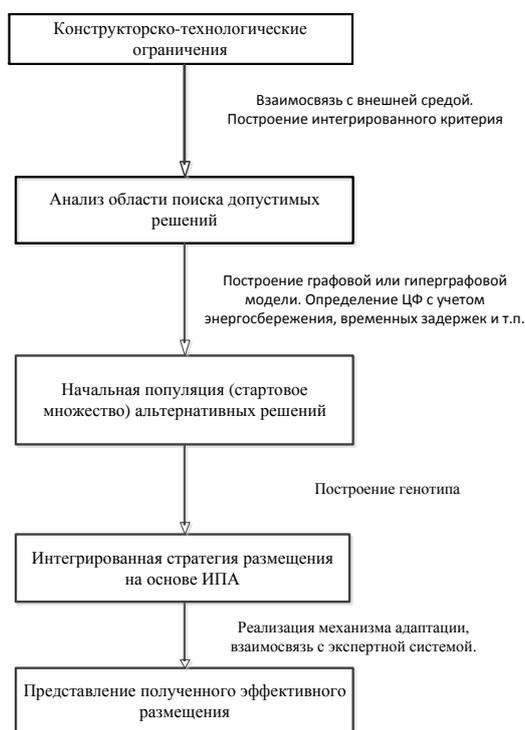


Рис. 1. Технология построения ИПА

Изначально на основе конструкторско-технологических ограничений при взаимосвязи с внешней средой сокращается область поиска допустимых решений. Далее, эта область анализируется, случайным или направленным образом генерируется начальная популяция или стартовое множество альтернативных решений, которое в дальнейшем развивается на основе выбранной эволюционной стратегии.

**3. Схема интегрированного поиска.** Упрощенная схема интегрированного поиска для решения задачи размещения, представлена на рис. 2 [13]. Здесь на «вход» поступают данные, полученные с предыдущего шага конструкторского проектирования (этап компоновки). В блоке предварительного размещения возможно использование «быстрых» алгоритмов (парных перестановок, метод ветвей и границ, релаксации и т.п.) для получения первоначального размещения. Далее, на основе знаний и опыта экспертов (блоки ЭС, БД, БЗ), происходит выбор методики наиболее приемлемой для решения поставленной задачи. В данном случае используются ИПА – алгоритмы, инспирированные природными системами. АС – модифицированный алгоритм Ant Colony, РИ – алгоритм на основе роевого интеллекта, БА, ГА, ЖА, ЭА и МО – бионический, генетический, жадный, эволюционный и моделирования отжига алгоритмы размещения. Затем происходит оценка эффективности, полученного решения. В случае получения удовлетворительного результата окончательный вариант размещения на следующий этап конструкторского проектирования (трассировка). Иначе происходит изменение управляющих параметров, процесс повторяется либо до достижения критерия останова, либо до получения приемлемого решения.

Для решения задач большой размерности возможно использование технологии распараллеливания алгоритмов [14, 15].

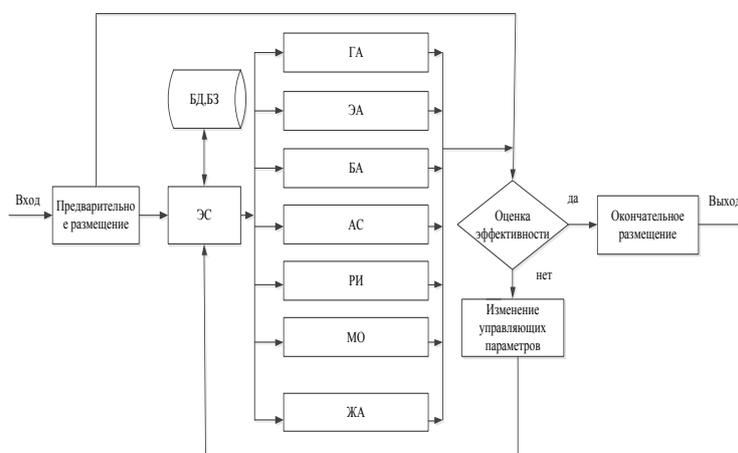


Рис. 2. Упрощенная схема интегрированного поиска

Приведем требования, предъявляемые к построению алгоритмов проектирования, на основе методов инспирированных природой [10, 12, 16].

1. Построение графовых и гиперграфовых моделей, ориентированных на исходную схему и область размещения.
2. Анализ модели коммутационной схемы для выявления массивов, на основе которых будут создаваться строительные блоки (группы альтернативных решений);
3. Построение комплексного интегрированного критерия с учетом величины энергосбережения, задержки сигналов и др. современных частных критериев.
4. Формирование начальных популяций для ИПА размещения необходимо осуществлять по комплексному критерию, а не только по связности.
5. Формирование популяции для следующей генерации алгоритма должно производиться на основе варьирования ее численности и других методов адаптации.
6. Проведение этапа миграции.
7. Процедура селекции будет выполняться на основе экспертной подсистемы (ЛПР) и внешней среды.
8. По завершении процедуры размещения строительных блоков необходимо выполнить процедуру размещения элементов внутри каждого блока с учетом информации об их взаиморасположении, без наложения друг на друга.

На основе перечисленных требований был разработан ряд инспирируемых природой алгоритмов размещения элементов схем ЭВА [17, 19]. Пример работы алгоритма поведения стаи серых волков в живой природе представлен далее.

**4 Алгоритм поведения стаи серых волков.** Алгоритм серого волка – мета-эвристический алгоритм поиска. Данный алгоритм был предложен Сейдали Мирджалили в 2013 году [7]. Работа алгоритма построена на основе модели охоты стаи серых волков. Полагают, что к волку, находящемуся ближе всего к добыче, перестраиваются остальные волки, образуя нечто похожее на кольцо. Далее волки опять приближаются к волку находящемуся ближе всего к добыче. Процесс перестроения происходит до тех пор, пока волки не собираются в стаю, это и будет оптимальное направление для атаки с минимальным расстоянием до добычи. Разработаны специальные математические модели, позволяющие имитировать процесс поведения стаи. Данные модели описывают: социальную иерархию, слеже-

ние, окружение и атаку [7, 8]. Изначально данный алгоритм в большей степени был предназначен для решения векторных задач. Поэтому возникла необходимость адаптации основных принципов работы алгоритма для решения задачи размещения. Инициализация исходной популяции стаи волков представляется в виде хромосом и осуществляется их кодирование/декодирование в соответствии со следующим принципом: номер ген в хромосомах – это посадочные места, а значения в этих генах - номера элементов, которые будут на этих посадочных местах.

Основные положения работы данного алгоритма заключаются в следующем. Предполагается существование четырех типов серых волков по иерархии, таких как Альфа – лидеры стаи, Бета – помощники Альфа, Дельта – старейшины и дозорные и Омега – все остальные. И есть три основных этапа охоты: поиск, окружение и нападение на жертву, реализуемые для выполнения оптимизации. На рис. 3 представлен этап окружения жертвы. Предполагается, что Альфа (лучший кандидат решения) Бета и Дельта имеют более четкое представление о потенциальном месте добычи. С помощью разработанных математических моделей, поисковые агенты (Омега-волки) обновляют свои позиции в соответствии с Альфа, Бета и Дельта-волками в N мерном пространстве поиска. Окончательная позиция будет в случайном месте внутри круга, который определяется положениями Альфа, Бета и Дельта в пространстве поиска. Другими словами Альфа, Бета и Дельта оценивают положение добычи, и другие волки обновляют свои позиции случайным образом вокруг добычи. Это обновление показано на рис. 4.

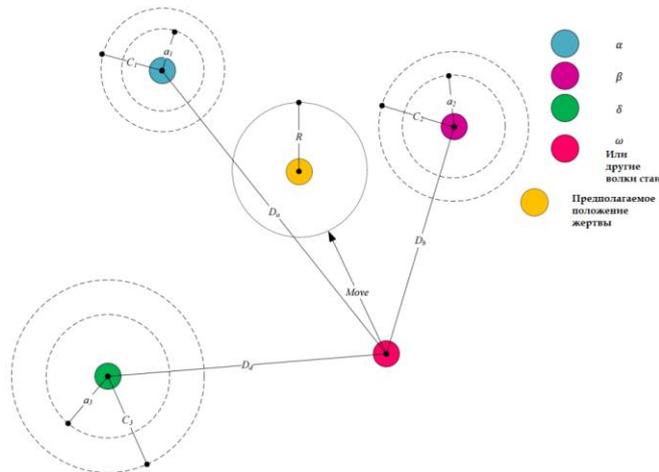


Рис. 3. Окружение

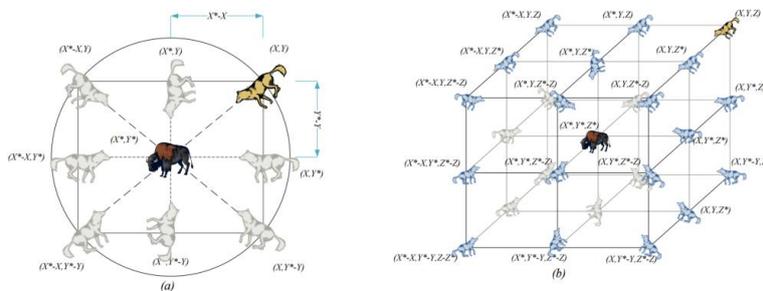


Рис. 4. Обновление позиций

Основные шаги схемы алгоритма стаи серых волков имеют следующий вид.

1. Инициализация начальной популяции хромосом  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
2. Инициализация параметра  $a$ . На данном этапе задается количество мутаций над хромосомами, что обеспечивает эффективное выполнение таких этапов работы алгоритма, как атака и разведка.
3. Вычисление приспособленности (целевой функции) каждого поискового агента.
4.  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$  – наиболее перспективные поисковые агенты в данный момент времени. Предполагается, что  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$  волки наиболее эффективным образом осуществляют поиск жертвы и ее окружения. Для этого необходимо отсортировать все хромосомы по возрастанию ЦФ.
5.  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$  будут являться первые три хромосомы.
6. Число итераций задается в исходных данных. По достижении этого параметра фиксируется значение  $X_\alpha$ .
7. Происходит обновление позиций волков  $X_{t+1}$  вокруг жертвы относительно  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ . Для этого необходимо выполнить упорядочивающий кроссинговер по следующему принципу:  $X_\alpha * X_\beta \rightarrow X^*$ ;  $X^* * X_\delta \rightarrow X_{t+1}$ . Таким образом,  $X_{t+1}$  получит свойства  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ .
8. Обновление параметра  $a$ , который уменьшается в ходе итераций, сокращая, таким образом, область поиска. Другими словами параметр  $a$ , как уже упоминалось, имитирует атаку.
9. В каждой итерации необходимо выполнять вычисление ЦФ всех поисковых агентов для дальнейшей фиксации лучшего решения.
10. Обновление  $X_\alpha, X_\beta$  и  $X_\delta$  как наиболее перспективных решений.
11. Если критерий «Кол-во итераций» достигнут, то следует фиксация  $X_\alpha$ , как самого лучшего решения.

**6. Результаты вычислительных экспериментов.** Экспериментальные исследования проводились на различных графах размерностью до 500 вершин. Одна из основных задач при использовании биоинспирированных алгоритмов – это поиск оптимальных параметров, при которых алгоритм показывает наиболее эффективные решения.

Определено оптимальное значение параметра  $a$  для АСВ. Исходные данные: размер популяции 100, число итераций 100, число размещаемых элементов 50. Результаты эксперимента приведены на рис. 5.

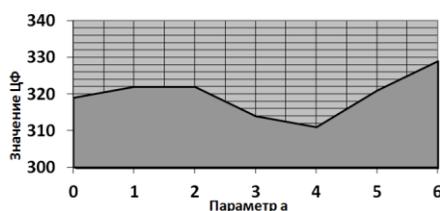


Рис. 5. Зависимость значения ЦФ от параметра  $a$

В результате эксперимента установлено, что оптимальным значением параметра  $a$  при данной выборке является 4.

На рис. 6 приведена зависимость времени работы АСВ от числа размещаемых элементов. Как видно, из графика, полученного на основе экспериментальных данных, ВСА зависит квадратично от числа элементов.

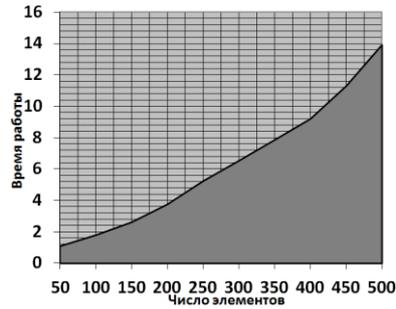


Рис. 6. Зависимость времени работы ACSB от числа размещаемых элементов

Проведен сравнительный анализ решений, полученных при помощи ГА, МА, ПА и ACSB для графа из 100 вершин при ограничении в 300 итераций для каждого алгоритма. Размер популяции во всех алгоритмах равен 100. Итоговый результат работы программного модуля по данному эксперименту показан на рис. 7.

Таблица 1

Сравнительный анализ работы алгоритмов

	Время работы, сек.	Значение ЦФ
ГА	9.563	1284
МА	38.407	1122
ПА	36.61	1064
ACSB	9.376	916

Как видно из табл. 1, ACSB является наиболее быстрым и эффективным алгоритмом из исследуемых биоинспирированных алгоритмов.

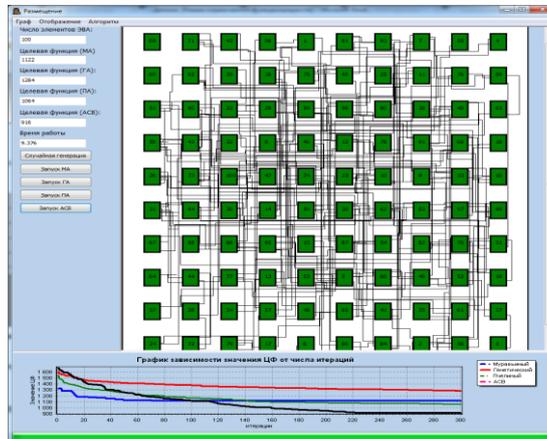


Рис. 7. Сравнительный анализ работы ГА, МА, ПА, ACSB

**Заключение.** В работе рассмотрен модифицированный подход к построению современных интеллектуальных информационных систем для задач проектирования и управления. Данный подход используется при разработке алгоритмов, инспирированных природными системами, для эффективного принятия решения в задачах САПР. Предлагаемая методика решения задач конструкторского проектирования ЭВА на основе алгоритмов, инспирированных природными системами, позволяет расширить область поиска данных без увеличения времени работы, со-

кратить преждевременную сходимость алгоритмов, повысить эффективность и качество получаемых решений. Данная работа показывает, что интеллект стаи с успехом можно применять для нахождения оптимального решения в размещении ЭВА. Следует отметить, что существует возможность дальнейшей модернизации рассмотренного алгоритма, для улучшения полученных результатов.

Эксперименты показали, что при размещении элементов на рабочем пространстве использование модифицированных ГО, нестандартных методов поиска и комбинированных моделей позволяет получать набор оптимальных решений. Из проведенных экспериментов следует, что в общем случае ВСА приближенно  $O(n^2)$ . Анализ экспериментов позволяет отметить, что инспирированные природой алгоритмы требуют больших затрат времени, но позволяют получать набор локально-оптимальных решений, в частном случае – оптимальных решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
2. *Поспелов Д.А.* Данные и знания. Искусственный интеллект. В 3 кн. Кн. 1. – М.: Радио и связь, 1990. – 464 с.
3. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования: учебник для ВУЗов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 432 с.
4. *Курейчик В.М., Курейчик В.В.* Эволюционные, синергетические и гомеостатические стратегии в искусственном интеллекте: состояние и перспективы // *Новости искусственного интеллекта.* – 2000. – № 3. – С. 39-67.
5. *Мальшев В.В., Пиявский Б.С., Пиявский С.А.* Методы принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности // *Известия РАН. Теория и системы управления.* – 2010. – № 1. – С. 46-61.
6. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев В.Б.* Планирование сверхбольших интегральных схем на основе интеграции моделей адаптивного поиска // *Известия РАН. Теория и системы управления.* – 2013. – № 1. – С. 84-101.
7. *Mirjalili S., Lewis A.* Grey Wolf Optimizer - *Advances in Engineering Software* 69. – 2014. – С. 46-61.
8. *Madadi A., Motlagh M.* Optimal Control of DC motor using Grey Wolf Optimizer Algorithm // *Technical Journal of Engineering and Applied Science.* – 2014. – No. 4-04. – P. 373-379.
9. *Гаврилова Т.А. Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб: Питер, 2000. – 384 с.
10. *Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kravchenko Yu.A.* Evolutionary Algorithm for Extremal Subsets Comprehension in Graphs // *World Applied Sciences Journal.* – 2013. – No. 24 (14).
11. *Курейчик В.М., Курейчик В.В., Родзин С.И.* Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2009. – № 4. – С. 16-25.
12. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Гибридный алгоритм разбиения на основе природных механизмов принятия решений // *Искусственный интеллект и принятие решений.* – 2012. – № 2. – С. 3-15.
13. *Kureichik V.V., Kureichik V.M., Sorokoletov P.V.* Analysis and a survey of evolutionary models // *Journal of Computer and Systems Sciences International.* – 2007. – Vol. 46, No. 5. – С. 779-791.
14. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл.* Интегрированный алгоритм размещения фрагментов СБИС // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 7 (156). – С. 84-93.
15. *Курейчик В.М., Курейчик В.В., Родзин С.И.* Модели параллелизма эволюционных вычислений // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения.* – 2011. – № 3. – С. 93-97.
16. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Gladkov L.A., Sorokoletov P.V.* Бионспирированные методы в оптимизации. – М.: Физмалит, 2009. – 384 с.
17. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Разбиение на основе моделирования адаптивного поведения биологических систем // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* – 2010. – № 2. – С. 28-34.

18. Лебедев Б.К., Лебедев В.Б. Размещение на основе метода пчелиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 12-19.
19. Гладков Л.А. Гибридный генетический алгоритм решения задачи размещения элементов СБИС с учетом трассируемости соединений // Вестник ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 58-66.
20. Курейчик В.В., Бова В.В., Курейчик Вл.Вл. Комбинированный поиск при проектировании // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 90-94.
21. Кулиев Э.В., Лежебоков А.А. Исследование характеристик гибридного алгоритма размещения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 255-261.

#### REFERENCES

1. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: uchebnoye posobie [Modern algorithms of search optimization algorithms, the inspiration provided by nature: a training manual]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014, 446 p.
2. Pospelov D.A. Dannyye i znaniya. Iskusstvennyy intellekt [The data and knowledge. Artificial intelligence]. In 3 book. Book 1. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 464 p.
3. Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: uchebnyk dlya VUZov [Fundamentals of computer-aided design: textbook for Universities]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2009, 432 p.
4. Kureychik V.M., Kureychik V.V. Evolyutsionnyye, sinergeticheskiye i gomeostaticheskiye strategii v iskusstvennom intellekte: sostoyaniye i perspektivy [Evolutionary, synergetic and homeostatic strategies in artificial intelligence: state and prospects], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [AI News], 2000, No. 3, pp. 39-67.
5. Malyshev V.V., Piyavskiy B.S., Piyavskiy S.A. Metody prinyatiya resheniy v usloviyakh mnogoobraziya sposobov ucheta neopredelennosti [Decision-making methods in a variety of ways of accounting for the uncertainty], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Journal of Computer and Systems Sciences International], 2010, No. 1, pp. 46-61.
6. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev V.B. Planirovaniye sverkhbol'shikh integral'nykh skhem na osnove integratsii modeley adaptivnogo poiska [Planning ultralarge integrated circuits on the basis of integration models adaptive search], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Journal of Computer and Systems Sciences International], 2013, No. 1, pp. 84-101.
7. Mirjalili S., Lewis A. Grey Wolf Optimizer - *Advances in Engineering Software* 69, 2014, pp. 46-61.
8. Madadi A., Motlagh M. Optimal Control of DC motor using Grey Wolf Optimizer Algorithm, *Technical Journal of Engineering and Applied Science*, 2014, No. 4-04, pp. 373-379.
9. Gavrilova T.A. Khoroshevskiy V.F. Bazy znaniy intellektual'nykh sistem [Knowledge base of intelligent systems]. St. Petersburg: Piter, 2000, 384 p.
10. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kravchenko Yu.A. Evolutionary Algorithm for Extremal Subsets Comprehension in Graphs, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 24 (14).
11. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Kontseptsiya evolyutsionnykh vychisleniy, inspirirovannykh prirodnyimi sistemami [Concept evolutionary computation is inspired by natural systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 4, pp. 16-25.
12. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Gibridnyy algoritm razbiyeniya na osnove prirodnykh mekhanizmov prinyatiya resheniy [A hybrid algorithm of splitting based on natural mechanisms of decision-making], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2012, No. 2, pp. 3-15.
13. Kureichik V.V., Kureichik V.M., Sorokoletov P.V. Analysis and a survey of evolutionary models, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2007, Vol. 46, No. 5, pp. 779-791.
14. Kureychik V.V., Kureychik V.V. Integrirovannyy algoritm razmeshcheniya fragmentov SBIS [Integrated vlsi fragment placement algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 84-93.
15. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Modeli parallelizma evolyutsionnykh vychisleniy [Models of parallelism in evolutionary computing], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Vestnik of Rostov state University of Railways], 2011, No. 3, pp. 93-97.

16. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Gladkov L.A., Sorokoletov P.V. Bionspirovannyye metody v optimizatsii [Inspirovannyye metody v optimizatsii]. Moscow: Fizmalit, 2009, 384 p.
17. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Razbienie na osnove modelirovaniya adaptivnogo povedeniya biologicheskikh sistem [Partitioning based on simulation of ADAP-alternative behavior of biological systems], *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primenenie* [Neurocomputers: Development, Application], 2010, No. 2, pp. 28-34.
18. Lebedev B.K., Lebedev V.B. Razmeshchenie na osnove metoda pchelinoy kolonii [Placement on the basis of the bee colony method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 12-19.
19. Gladkov L.A. Gibridnyy geneticheskiy algoritm resheniya zadachi razmeshcheniya elementov SBIS s uchedom trassiruemosti soedineniy [A hybrid genetic algorithm for solving the problem of placing of elements VLSI taking into account the traceability of compounds], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Vestnik of Rostov state University of Railways], 2011, No. 3, pp. 58-66.
20. Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.I. Kombinirovannyi poisk pri proektirovanii [Combined search in the design], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational Resources and Technology], 2014, No. 2 (5), pp. 90-94.
21. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A. Issledovanie kharakteristik gibridnogo algoritma razmeshcheniya [Research parameters of hybrid algorithm for placement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 255-261.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

**Щеглов Сергей Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: srg\_sch@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер Некрасовский, 44; тел.: 88634371625; кафедра САПР; к.т.н.; доцент.

**Shcheglov Sergey Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: srg\_sch@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371625; the department of computer aided design; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.87:681.51

**Р.А. Нейдорф, М.Н.М. Мохсен, А.Р. Нейдорф**

### **УНИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И СИНТЕЗА ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ\***

*Исследована проблема построения математических моделей процессов и аппаратов технологических систем, использующих жидкие среды при совместном протекании химических, массообменных, теплообменных и других процессов. Показано, что общность базовой модели накопления в любом технологическом объеме вещества или энергии, которые обобщены понятием субстанции, позволяет унифицировать построение моделей многих технологических объектов. Вводятся базовые переменные, обозначающие накапливаемые субстанции, аккумулирующие объемы и потоки обмена с другими объектами технологической системы. Унификация возможна при сосредоточенности параметров. Аппарат, характеризующийся единым объемом с протекающими технологическими процессами, представляется системой однотипных базовых дифференциальных уравнений баланса преобразуемых в нем субстанций. Они преобразуются в рабочие математические модели изменения переменных технологического состояния аппарата подстановкой вместо базовых переменных локальных математических моделей отдельных свойств исследуемого процесса. Эти модели выражаются через измеряемые переменные технологического состояния аппарата, а также через конструктивные, механические, физико-химические и другие параметры моделируемого технологического объекта. Анализируются структурные возмож-*

\* Работа выполнена в рамках индивидуального плана аспирантской подготовки.

ности управления такими объектами, и выявляются факторы, влияющие на его эффективность. К важнейшим из них отнесены существенная нелинейность, существенная связность переменных технологического состояния и возможность решать задачи синтеза законов управления процессами в общем накопителе на основе математических моделей невысокого порядка. На примере условного технологического объекта управления показывается принципиальная возможность осуществлять синтез унифицированных векторных законов координированного связного управления технологическими аппаратами рассмотренного типа. Это показывает эффективность предложенной унификации их математического моделирования.

*Технологический аппарат; математическая модель; закон сохранения; материальные и энергетические субстанции; материальные и энергетические потоки; уравнение баланса; система дифференциальных уравнений; нелинейность; связность; закон управления.*

**R.A. Neydorf, M.N.M. Mohsen, A.R. Neydorf**

### **UNIFICATION PROBLEMS OF MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL OBJECTS AND SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL VARIABLES CONTROL LAWS**

*The problem of constructing mathematical models of processes and devices of technological systems, using liquid and gaseous media at a joint course of chemical, mass transfer, heat transfer and other processes. It is shown that the common base of the mathematical model any technological accumulation amount of matter or energy, which summarizes the concept of substance, it allows to unify the construction of the model of most technological objects. For this purpose we introduce the basic variables, indicating the accumulated substance, accumulating volumes and fluxes of exchange with other objects of the technological system. Unification is possible with lumped parameters. The device which is characterized by united volume of the proceeding technological processes is described by system of the one type basic differential equations of balance of the substances, which transform in him. They are converted to the working mathematical model of the variables of technological substitution state process vessel instead of the basic variables of local mathematical models of the individual properties of the studied process. These models are expressed through actual measured variables of technological state of the device, as well as through structural, mechanical, physical, chemical, and other technological parameters of the modeling object. It is analyzed the structural capabilities of such objects control, and the factors affecting its efficiency are defined. The most important of them are classified as a significant non-linearity, a substantial connection process variables and the ability to solve problems of the synthesis process control laws in the shared drive on the basis of mathematical models of a low order. On the example of conditional technological object of control a basic opportunity to perform synthesis of the normalized vector laws of coordinated control of technological devices of the considered type is shown. considered. This shows the effectiveness of the proposed unification of their mathematical modeling.*

*Process vessel; mathematical model; conservation law; material and energy substances; material and energy flows; balance equation; differential equations system; nonlinearity; connectivity; control law.*

**Введение.** Основополагающие результаты по математическому моделированию технологических систем сформулированы в середине прошлого века. Большая заслуга в превращении методов моделирования в отдельную научную дисциплину принадлежит академику В.В. Кафарову и ученикам его школы [1], а также другим российским [2–4], и зарубежным [5–8] учеными. В этих и других работах разработаны фундаментальные принципы построения математических моделей (ММ), решены и решаются многие задачи моделирования химико-технологических процессов. В частности, известны работы, систематизирующие подходы к моделированию на основе понятий элементарных накопителей и потоков обмена [9, 10]. Они направлены на математическое описание систем, называемых "технологическими" [9]. К технологическим системам (ТЛС) относят производства химической, нефтеперерабаты-

вающей, пищевой, и др. отраслей промышленности. Они отличаются большой пространственной протяженностью, использованием жидких и газообразных сред, совместным протеканием химических, массо- и теплообменных и др. процессов [5–13]. Как ТЛС, так и составляющие их технологические объекты (ТО) разнообразны и сложны. Они описываются существенно нелинейными системами дифференциальных уравнений высоких порядков, что усложняет их анализ [11–14].

Автоматизация ТЛС возможна при наличии ММ процессов технологических преобразований сырья в продукт. Развитие методов их математического моделирования продолжается как в России, так и за рубежом [15–18]. Поэтому актуальными являются решение задачи унификации построения ММ ТО и разработка для них высокоэффективных законов управления [19, 20].

**Постановка задачи исследования.** В статье ставится и решается задача формализации подхода к построению ММ ТО ТЛС на основе базовых понятий, определяющих суть химико-технологических процессов. Ставится задача получить унифицированные структуры ММ для ТО ТЛС, и показать использование этих структур ММ для синтеза унифицированных законов управления такими ТО.

**Методологический базис построения математических моделей.** Возможность априорного построения ММ опирается на фундаментальные законы сохранения, которым подчиняются все исследуемые процессы. Для ТО законы сохранения проявляются в обменном балансе вещества или энергии в системе при обмене с окружающей средой [9, 10]. Другими словами: разность прихода и ухода любой субстанции равна изменению в ТО ее запаса. Поэтому рассматриваемый подход к моделированию ТО основывается на ММ закона сохранения. Она представляется дифференциальным уравнением (ДУ) баланса неустановившегося процесса накопления. Левая часть этого ДУ описывает накопительные свойства ТО, а правая – влияние ТЛС как внешней среды на накопления субстанции в ТО. Модель процесса накопления представляет собой ДУ первого порядка

$$dQ^{ac}(t)/dt = q^{in}(t) - q^{ou}(t), \quad (1)$$

где  $Q^{ac}(t)$  – изменяющийся во времени  $t$  запас накопленной в ТО некоторой субстанции, а  $q^{in}(t) = dQ^{in}(t)/dt$  и  $q^{ou}(t) = dQ^{ou}(t)/dt$  – суммарные потоки вводимой  $Q^{in}(t)$  и выводимой  $Q^{ou}(t)$  субстанции.

Уравнение (1) представляет собой универсальную динамическую основу ММ, описывая самые общие свойства ТО рассматриваемого типа [9, 10]. Компоненты: приход, расход и накопление – это его обязательные универсальные составляющие. Следовательно, все ТО рассматриваемого типа описываются единым базисным ДУ (1). Индивидуальность каждой ММ определяется моделями ее составляющих. Если ТО характеризуется одинаковой плотностью распределения накопленной субстанции  $Q^{ac}(t)$  по объему, то уравнение (1) является уравнением в полных производных [9, 10]. Если же распределение субстанции по объему объекта является неоднородным и  $Q^{ac} = Q^{ac}(t, x)$ , то (1) вырождается в ДУ в частных производных, что существенно усложняет ММ.

В статье исследуется задача построения ММ ТО, когда приемлема гипотеза об однородности распределения накопленной субстанции, т.е. рассматриваются, фактически, ТО с сосредоточенными параметрами. Унификации процесса их моделирования посвящено исследование.

Анализ уравнения (1) показывает, что методика аналитического построения ММ ТО с сосредоточенными параметрами может основываться на таких фундаментальных понятиях как субстанция, накопитель, поток [10]. В этом случае можно абстрагироваться от конкретного моделируемого ТО и получить ММ динами-

ческой основы процессов, протекающих в условном технологическом объекте. В реальном ТО величины  $Q$  и  $q$  выражаются через конструктивные, технологические или физические переменные, параметры и коэффициенты с использованием локально выведенных ММ.

**Накопительная математическая модель технологического объекта.** Накапливаемые в ТО формы вещества или энергии можно объединить понятием субстанции [10], при этом объектами накопления в ТО будут различные субстанции, а субъектами их накопления будут собственно ТО. Для полного системного анализа ММ ТО и формализации процесса ее построения необходимо рассмотреть локальные математические модели для составляющих уравнения (1): **субстанции, накопителя и потока**.

Понятие субстанции обобщает суть накапливаемых вещества или энергии в моделируемом ТО. У субстанции, будь то вещество или энергия, обычно существует некоторый материальный носитель. Он может характеризоваться либо массой, либо объемом, в котором она распределена. Для определенности далее рассматривается распределение субстанции в объеме  $V$ , которое при известной механической плотности вещества-носителя всегда может быть переведено в эквивалентную массу. Поэтому будем считать, что количественно накапливаемая или переносимая в процессе функционирования ТО  $S$ -я субстанция характеризуется базовой переменной – **плотностью** ее распределения в носителе. При равномерном распределении некоторого количества субстанции  $Q_s$  по объему носителя  $V$ , ее плотность  $\rho_s(t)$  определится формулой:

$$\rho_s(t) = \frac{Q_s(t)}{V(t)}, \quad (2)$$

В (2) все величины считаются переменными во времени, однако в частных случаях параметр  $V$  может быть и константой.

Накопленная в ТО технологическая среда-носитель характеризуется определенной **плотностью субстанции**  $\rho_s^V(t)$ . Поэтому запас субстанции  $S$  в аппарате –  $Q_V^{ac}(t)$  определятся, с учетом (2), через параметр  $V_\rho^{ac}$  формулой:

$$Q_V^{ac}(t) = V_\rho^{ac}(t) \rho_s^V(t), \quad (3)$$

где  $s = \overline{1, n}$ , где  $n$  – количество субстанций, обеспечивающих процесс в ТО.

Изменение накопления, описываемое в (1) формулой (3) происходит за счет процессов переноса субстанции  $S$  потоком материальной среды. Поэтому в нем необходимо выразить и учесть текущую плотность субстанции  $\rho_s(t)$ , т.е. потоки субстанции  $q_s^{in}(t)$  и  $q_s^{ou}(t)$  необходимо выразить через **физические потоки** технологической среды которой обменивается аппарат:  $g_i^{in}(t)$  и  $g_j^{ou}(t)$ , где  $i = \overline{1, I}$  и  $j = \overline{1, J}$  – условные номера входных и выходных потоков моделируемого ТО. Эти потоки переносят субстанцию  $S$  с плотностями  $\rho_{si}^{in}(t)$  и  $\rho_{sj}^{ou}(t)$  от источников этих потоков. Следовательно, потоки субстанций в ДУ (1) выразятся формулами:

$$\left. \begin{aligned} q^{in}(t) &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{si}^{in}(t); & (a) \\ q^{ou}(t) &= \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{sj}^{ou}(t). & (b) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом, для технологического процесса, протекающего в аппарате с участием определенного его технологией количества субстанций  $n$ , подстановкой в уравнение (1) формул (3) и (4 а, б) с учетом (2), это уравнение преобразуется в систему  $n$  ДУ следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} V_{\rho}^{ac}(t) \cdot \frac{d\rho_s^V(t)}{dt} + \rho_s^V(t) \cdot \frac{dV_{\rho}^{ac}(t)}{dt} &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{si}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{sj}^{ou}(t); \\ s &= \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При условии  $V_{\rho}^{ac}(t) = const$ , т.е. когда процессы протекают в замкнутом и полностью заполненном объеме аппарата, во всех уравнениях системы ДУ (5) производная от  $V_{\rho}^{ac}(t)$  равна нулю. В этом частном случае уравнения этой системы упрощаются и приводятся к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\rho_s^V(t)}{dt} &= \frac{1}{V_{\rho}^{ac}(t)} \left[ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{si}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{sj}^{ou}(t) \right]; \\ s &= \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При  $V_{\rho}^{ac}(t) = var$ , когда аппарат имеет свободный уровень, в системе  $n$  уравнений (5) число переменных технологического состояния (ПТС) ТО оказывается равным  $n + 1$ . В этом случае целесообразно одной из субстанций процесса считать саму технологическую среду. При этом в формуле (2) появится «первая субстанция»  $Q_V^{ac}(t) = V_{\rho}^{ac}(t)$ , причем её плотность  $\rho_1(t) = 1$ . Тогда в первом уравнении (5)  $d\rho_1(t) / dt = 0$ , и система ДУ (5) приведет к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_{\rho}^{ac}(t)}{dt} &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{li}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{lj}^{ou}(t); \\ \frac{d\rho_s^V(t)}{dt} &= \\ &= \frac{1}{V_{\rho}^{ac}(t)} \left\{ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) [\rho_{si}^{in}(t) - \rho_{li}(t) \rho_s^V(t)] - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) [\rho_{sj}^{ou}(t) - \rho_{lj}(t) \rho_s^V(t)] \right\}; \\ s &= \overline{2, n}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Нелинейные функции, связывающие переменные ММ, отражают свойства ТО, как объектов управления. Эти вопросы обсуждаются ниже.

**Нелинейность математических моделей технологических объектов.** Простота накопительных ММ ТО (6), (7) объясняется их общностью. Любая конкретизация сути математических моделей резко усложняет их [9, 14]. Например, накопление вещества определяется произведением объема и концентрации, а тепла - произведением массы, теплоемкости и температуры и т.п. Когда в (3) и  $V^{ac}(t)$ , и  $\rho_1(t)$  являются переменными, то наличие производных как от  $V^{ac}(t)$ , так и от  $\rho_1(t)$  структурно усложняет модель. Если на объем накопления влияют другие ПТС, то в левой части ДУ (6) или (7) может сформироваться очень сложное выражение.

Потоки обмена субстанций между ТО и другими аппаратами ТЛС, как видно из формул (4), также являются мультипликативными. Они задаются произведениями объемов  $g_i^{in}(t)$  или  $g_j^{ou}(t)$  на соответствующие концентрации, или же масс на теплоемкость и температуру и т.п. В результате и в правую часть ДУ (6) или (7) попадают сложные мультипликативные нелинейные функции.

Влияние ПТС и входных воздействий на переменные  $V^{ac}(t)$  и  $\rho_1(t)$ , входящие в (6) и (7), описываются, зачастую, еще более сложными, нелинейными выражениями. Зависимость кинетической энергии потока в трубопроводе от его скорости, потери энергии в нем, закон действующих масс для зависимости скорости химической реакции от концентраций реагентов выражаются степенными функциями:  $K(t) = M(t)v(t)^2/2$ ,  $v_r(c,t) = k_0 c_a^{\lambda_a}(t)c_b^{\lambda_b}(t)$ . Здесь  $M(t)$  – масса потока в трубопроводе;  $k_0$  – константа скорости реакции,  $c_a(t)$ ,  $c_b(t)$  – концентрации реагентов,  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$  – стехиометрические коэффициенты реакции. Зависимость скорости химической реакции от ПТС включает несколько нелинейных функций:

$$w_p(t) = k_0 \exp\left(\frac{E(\theta, p)}{R(\theta, p) \cdot \theta(t)}\right) c_a^{\lambda_a}(t) c_b^{\lambda_b}(t),$$

где  $E$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $p$  – давление.

Достаточно существенна даже в первом приближении нелинейность расхода газа или жидкости через регулирующий орган:

$$G(t) = \alpha(t) \text{sign}[p_1(t) - p_2(t)] \sqrt{|p_1(t) - p_2(t)|},$$

где  $\alpha(t)$  – пропускная способность регулирующего органа,  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$  – давления на входе и выходе.

**Порядок и связность математических моделей ТО.** Разработка ММ (6) и (7) исследуемых ТО показала, что порядок их обобщенной векторной формы строго определен количеством  $I + J$  субстанций, участвующих в ТП объекта. Анализ структур развернутых в скалярную систему уравнений моделей (6) и (7) показывает высокую внутреннюю связность их переменных, как ТПС, так и, в особенности, по каналам внешнего воздействия на ТО, которое в ТЛС осуществляется, преимущественно, через материальные потоки  $g_i^{in}(t)$  и  $g_j^{ou}(t)$ .

На примере системы скалярных ДУ, получаемых развертыванием (7)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_p^{ac}(t)}{dt} &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{1i}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{1j}^{ou}(t); \\ \frac{d\rho_2^V(t)}{dt} &= \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left\{ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) [\rho_{2i}^{in}(t) - \rho_{1i}^{in}(t) \rho_2^V(t)] - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) [\rho_{2j}^{ou}(t) - \rho_{1j}^{ou}(t) \rho_2^V(t)] \right\}; \\ &\vdots \\ \frac{d\rho_n^V(t)}{dt} &= \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left\{ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) [\rho_{ni}^{in}(t) - \rho_{1i}^{in}(t) \rho_n^V(t)] - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) [\rho_{nj}^{ou}(t) - \rho_{1j}^{ou}(t) \rho_n^V(t)] \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

хорошо видно, что переменный объем накопителя ТО влияет на изменение всех ПТС, а на изменение запаса технологической среды влияют все потоки  $g_i^{in}(t)$  и  $g_j^{ou}(t)$ .

Накопительная плотность каждой субстанции  $\rho_s(t)$  может влиять и на скорость ее накопления. Кроме того, на изменение любой субстанции влияют входящие и выходящие потоки, которые её переносят, т.е. те потоки, которые имеют в правых частях соответствующих скалярных ДУ в (8) ненулевые множители  $\rho_{si}(t)$  или  $\rho_{sj}(t)$ .

Выявленные структурные свойства ММ ТО влияют на возможности разработки законов управления. Эта проблема рассматривается далее на примере.

**Пример синтеза закона управления условным технологическим объектом с сильно связанными и нелинейными математическими моделями.** Рассмотрим условный ТО со свободно меняющимся объемом и тремя накапливаемыми в нем разнородными субстанциями: самым объемом накапливаемой технологической среды с плотностью субстанции  $\rho_1^V(t) = 1$ , и двумя материальными субстанциями с плотностями субстанций  $\rho_2(t)$  и  $\rho_3(t)$ . Аппарат имеет три входящих  $g_1^{in}(t)$ ,  $g_2^{in}(t)$  и  $g_3^{in}(t)$  потока и один выходящий поток  $g_1^{ou}(t)$ . Первый поток, как растворитель, имеет нулевую плотность обеих субстанций, т.е.  $\rho_{21}^{in}(t) = \rho_{31}^{in}(t) = 0$ , а второй и третий характеризуются плотностями  $\rho_{22}^{in}(t)$ ,  $\rho_{33}^{in}(t)$  и  $\rho_{23}^{in}(t) = \rho_{32}^{in}(t) = 0$ , соответственно. Плотность первой объемной субстанции у всех потоков, естественно, одинакова:  $\rho_{11}^{in}(t) = \rho_{12}^{in}(t) = \rho_{13}^{in}(t) = \rho_{11}^{ou}(t) = 1$ . Аппарат снабжен эффективной мешалкой. Поэтому плотность субстанций в выходном потоке  $\rho_{21}^{ou}(t) = \rho_2(t)$  и  $\rho_{31}^{ou}(t) = \rho_3(t)$ . Подставляя соответствующие условному ТО переменные и константы в универсальную ММ (8) и преобразуя, получим следующую систему ДУ:

$$\frac{dV_p^{ac}(t)}{dt} = g_1^{in}(t) + g_2^{in}(t)\rho_{12}^{in}(t) + g_3^{in}(t)\rho_{13}^{in}(t) - g_1^{ou}(t); \quad (a) \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_2^V(t)}{dt} = \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left[ g_2^{in}(t)\rho_{22}^{in}(t) - \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_2^V(t) \right]; \quad (b)$$

$$\frac{d\rho_3^V(t)}{dt} = \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left[ g_3^{in}(t)\rho_{33}^{in}(t) - \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_3^V(t) \right]. \quad (c)$$

Как видно из конкретной структуры ММ условного ТО, рассматриваемого в статье типа, в ней присутствуют все особенности, рассмотренные в предыдущем пункте. Мультипликативные нелинейности правых частей всех уравнений (9), выражены в операциях перемножения входных воздействий на плотности субстанций. Кроме того, в уравнениях (9 a, b) присутствует операция деления на переменную  $V_p^{ac}(t)$ , которая при переходе к рабочей ММ выражается через уровень, что существенно влияет на динамику управления ПТС [10, 19–20]. Кроме того, нелинейное алгебраическое взаимодействие ПТС ТО и внешних воздействий обуславливают высокую степень связности всех переменных управляемого ТП.

Основная особенность ММ (9) состоит в том, что все ПТС ТО напрямую зависят от входных потоков  $g_1^{in}(t)$ ,  $g_2^{in}(t)$  и  $g_3^{in}(t)$ . Причем от выходного потока непосредственно зависит только накопление среды в ТО (уровень). Это свойство полинакопительной технологической структуры типичных ТО делает нерациональными и неэффективными традиционные одноконтурные системы автоматизации ТП. Естественными управляющими воздействиями в таких ТО являются входные потоки, поэтому несвязанное с другими потоками управление любым потоком приводит к возмущенным переходным процессам в каналах управления остальными потоками.

В связи с этим авторами предложен и развит в ряде работ [20, 21] подход к решению задачи синтеза единого векторного закона управления (ЗУ), обеспечивающего согласованные управляющие воздействия на все потоки ТО при управле-

нии как одной, так и несколькими ПТС одновременно. Сущность этого подхода сводится к использованию двух, уже доказавших свою состоятельность подходов к синтезу законов управления (ЗУ) для систем автоматического управления: использование для синтеза так называемых желаемых (или эталонных) ММ САУ, и метода отождествления высших производных [9]. Эффективному применению этих подходов способствуют структурные свойства унифицированной ММ ТО: она представлена системой ДУ в форме Коши и характеризуется наличием управляющих воздействий во всех ДУ системы. Это позволяет несложно получать векторный ЗУ согласованного управления ТО в целом, т.е. управления всем вектором ПТС ТО.

Пусть желаемые свойства САУ условным ТО с ММ (9) заданы системой

$$\begin{aligned} \frac{dV_{\rho}^{ac}(t)}{dt} &= f_1(z_1, V_{\rho}^{ac}, G, t); & (a) \\ \frac{d\rho_2^V(t)}{dt} &= f_2(z_2, \rho_2^V, R, G, t); & (b) \\ \frac{d\rho_3^V(t)}{dt} &= f_3(z_3, \rho_3^V, R, G, t), & (c) \end{aligned} \quad (10)$$

где  $z_i(t)$  – задания на текущие значения ПТС;  $G(t)$  и  $R(t)$  – векторы входных потоков и ПТС; нелинейные функции  $f_i(\dots)$  выбраны в соответствии с требованиями технологии ТО и устойчивости системы ДУ (10).

Естественными для описанного условного ТО управляющими воздействиями следует выбрать  $g_1^{in}(t)$ ,  $g_2^{in}(t)$  и  $g_3^{in}(t)$ . Тогда векторный ЗУ ТО, полученный отождествлением производных будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} g_1^{in}(t) &= f_1(z_1, V_{\rho}^{ac}, G, t) - g_2^{in}(t)\rho_{12}^{in}(t) - g_3^{in}(t)\rho_{13}^{in}(t) + g_1^{ou}(t); & (a) \\ g_2^{in}(t) &= \frac{1}{\rho_{22}^{in}(t)} \left[ V_{\rho}^{ac}(t) f_2(z_2, \rho_2^V, R, G, t) + \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_2^V(t) \right]; & (b) \\ g_3^{in}(t) &= \frac{1}{\rho_{22}^{in}(t)} \left[ V_{\rho}^{ac}(t) f_3(z_3, \rho_3^V, R, G, t) + \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_3^V(t) \right]. & (c) \end{aligned} \quad (11)$$

Векторные ЗУ, полученные по типу (11) синтезировались и исследовались в работах [19, 20]. Компьютерное моделирование показало, что они обладают синхронностью воздействия на ТО и исключают переходные процессы по связанным каналам управления ППС.

**Заключение.** Формализация подхода к построению математических моделей технологических объектов на основе общих понятий субстанции, накопителей и потоков позволяет унифицировать формы моделей для ТО с сосредоточенными параметрами любой сложности. На их основе формализуется и процедура синтеза унифицированных законов управления ими. Этот результат может послужить методологической основой для создания САПР математических моделей и систем автоматического управления объектами технологических систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии: Энтропийный и вариационный методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии. – М.: Наука, 1988. – 367 с.
2. Гумеров Ас.М., Валеев Н.Н., Гумеров Аз.М., Емельянов В.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие. – Казань, КГТУ, 2006. – 216 с.

3. *Тихонов В.А., Лановецкий, С.В., Косвинцев О.К.* Моделирование химико-технологических систем: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Березниковского филиала Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 61 с.
4. *Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Митянина О.Е., Кузьменко Е.А.* Математическое моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2014. – 135 с.
5. *Roffel B., Betlem B.* Process Dynamics and Control: Modeling for Control and Prediction. – England [etc.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. – 560 p.
6. *White R.E., Subramanian V.R.* Computational Methods in Chemical Engineering with Maple. – Berlin [etc.]: Springer, 2010. – 860 p.
7. *Rice R.G., Duong D.Do.* Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers. – New Jersey [etc.]: Wiley, 2012. – 397 p.
8. *Banerjee S.* Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications. – Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2014. – 276 p.
9. *Нейдорф Р.А., Соловей Н.С.* Теория автоматического управления в технологических системах: учеб. пособие. – Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. – 212 с.
10. *Мохсен М.Н.М.* Алгоритм формализованного построения математических моделей технологических процессов на основе обобщенного уравнения накопления // Системный анализ, управление и обработка информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. семинара, 19-24 окт. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2015. – С. 56-61. – Режим доступа: <http://www.ntb.donstu.ru/content/2015421>.
11. *Smith R.* Chemical process Design and Integration. – West Sussex [etc.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 687 p.
12. *Cinar A., Palazoglu A., Kayihan F.* Chemical process performance evaluation. – Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2007. – 310 p.
13. *Buzzi-Ferraris G., Manenti F.* Nonlinear Systems and Optimization for the Chemical Engineer: Solving Numerical Problems. – Weinheim, Germany: Wiley, 2014. – 524 p.
14. *Бородин И.Ф., Судник К.А.* Автоматизация технологических процессов. – М.: КолосС, 2004. – 344 с.
15. *Altmann W.* Practical Process Control for Engineers and Technicians. – Amsterdam [etc.]: Elsevier-Newnes, 2005. – 304 p.
16. *Харозов В.Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами: методическое пособие. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с.
17. *Hollender M.* Collaborative Process Automation Systems. – [S. l.: s. n.], 2010. – 408 p.
18. *Мохсен М.Н.М., Нейдорф Р.А.* Синтез законов квазиоптимального управления технологическими объектами первого порядка // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru>.
19. *Мохсен М.Н.М., Нейдорф Р.А.* Нелинейная векторная квазиоптимизация управления производственным процессом при объектно обусловленной динамической связности переменных технологического состояния // Научное обозрение. – 2016. – № 1. – С. 266-279.
20. *Нейдорф Р.А., Мохсен М.Н.М.* Автоматическая система взаимно инвариантного векторного управления переменными технологического состояния аппарата приготовления раствора // Вестник ДГТУ. – 2016. – Т. 16, № 1 (84). – С. 143-153.

## REFERENCES

1. *Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Kol'tsova E.M.* Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii: Entropiynyy i variatsionnyy metody neravnovesnoy termodinamiki v zadachakh khimicheskoy tekhnologii [System analysis of processes of chemical technology: Entropy and variational methods of nonequilibrium thermodynamics to the problems of chemical engineering]. Moscow: Nauka, 1988, 367 p.
2. *Gumerov As.M., Valeev N.N., Gumerov Az.M., Emel'yanov V.M.* Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: ucheb. posobie [Mathematical modeling of chemical-technological processes: teaching medium]. Kazan', KGTU, 2006, 216 p.
3. *Tikhonov V.A., Lanovetskiy, S.V., Kosvintsev O.K.* Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh sistem: ucheb. posobie [Simulation of chemical processes: teaching medium]. Perm': Izd-vo Berznikovskogo filiala Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2012, 61 p.
4. *Uшева N.V., Мойзес О.Е., Митянина О.Е., Кузьменко Е.А.* Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: ucheb. posobie [Mathematical modeling of chemical-technological processes: teaching medium]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2014, 135 p.

5. *Roffel B., Betlem B.* Process Dynamics and Control: Modeling for Control and Prediction. England [etc.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. – 560 p.
6. *White R.E., Subramanian V.R.* Computational Methods in Chemical Engineering with Maple. Berlin [etc.]: Springer, 2010, 860 p.
7. *Rice R.G., Duong D.Do.* Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers. New Jersey [etc.]: Wiley, 2012, 397 p.
8. *Banerjee S.* Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications. Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2014, 276 p.
9. *Neydorf R.A., Solovey N.S.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v tekhnologicheskikh sistemakh: ucheb. posobie [Automatic Control Theory in technological systems: teaching medium]. Ukhta: Institut upravleniya, informatsii i biznesa, 2005, 212 p.
10. *Mokhsen M.N.M.* Algoritm formalizovannogo postroyeniya matematicheskikh modeley tekhnologicheskikh protsessov na osnove obobshchennogo uravneniya nakopleniya [The formalized algorithm of construction of mathematical models of technological processes on the basis of generalized equation of accumulation], *Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. seminar, 19-24 okt.* [System analysis, management and processing information: collection of works: VI Int. Sci. Sem, 19-24 Oct.]. Rostov-on-Don: DGTU, 2015, S. 56-61. Available at: <http://www.ntb.donstu.ru/content/2015421>.
11. *Smith R.* Chemical process Design and Integration. West Sussex [etc.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005, 687 p.
12. *Cinar A., Palazoglu A., Kayihan F.* Chemical process performance evaluation. Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2007, 310 p.
13. *Buzzi-Ferraris G., Manenti F.* Nonlinear Systems and Optimization for the Chemical Engineer: Solving Numerical Problems. Weinheim, Germany: Wiley, 2014, 524 p.
14. *Borodin I.F., Sudnik K.A.* Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov [Automation of technological processes]. Moscow: KolosS, 2004, 344 p.
15. *Altmann W.* Practical Process Control for Engineers and Technicians. Amsterdam [etc.]: Elsevier-Newnes, 2005, 304 p.
16. *Kharazov V.G.* Integrirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami: metodicheskoe posobie [Integrated systems of control of technological processes: a Methodological guide]. St. Petersburg: Professiya, 2009, 592 p.
17. *Hollender M.* Collaborative Process Automation Systems. [S. l.: s. n.], 2010, 408 p.
18. *Mokhsen M.N.M., Neydorf R.A.* Sintez zakonov kvazioptimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi ob'ektami pervogo poryadka [Synthesis of laws of quasioptimal control of technological objects of the first order], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, No. 4, Available at: <http://ivdon.ru>.
19. *Mokhsen M.N.M., Neydorf R.A.* Nelineynaya vektornaya kvazioptimizatsiya upravleniya proizvodstvennym protsessom pri ob'ektno obuslovlennoy dinamicheskoy svyaznosti peremennykh tekhnologicheskogo sostoyaniya [Nonlinear vector quasioptimal process control in an object due to dynamic connectivity variables technological status], *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2016, No. 1, pp. 266-279.
20. *Neydorf R.A., Mokhsen M.N.M.* Avtomaticheskaya sistema vzaimno invariantnogo vektornogo upravleniya peremennymi tekhnologicheskogo sostoyaniya apparata prigotovleniya rastvora [Automatic system of mutually invariant vector control variable technological status of the device preparation of solution], *Vestnik DGTU* [Vestnik of DSTU], 2016, Vol. 16, No. 1 (84), pp. 143-153.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.И. Фандеев.

**Нейдорф Рудольф Анатольевич** – Донской государственный технический университет; e-mail: ran\_pro@mail.ru; 344010, г. Ростов-на-Дону, ул. Гагарина, 1; тел: +79034722292; д.т.н., профессор.

**Нейдорф Анна Рудольфовна** – e-mail: neydan@yandex.ru; тел.: 88632738427; к.ф.н.; доцент.

**Мохсен Мохаммед Неама Мохсен** – e-mail: Mohammed.naima@gmail.com; 344000, г. Ростов-на-Дону, пер. Университетский, 133, кв. 101; тел.: 89888938840; аспирант.

**Neydorf Rudolf Anatolyevich** – Don State Technical University; e-mail: ran\_pro@mail.ru; 1, Gagarin street, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phone: +79034722292; dr. of eng. sc.; professor.

**Neydorf Anna Rudolfovna** – e-mail: neydan@yandex.ru; phone: +78632738427; dr. of phil. sc.; associate professor.

**Mohsen Mohammed Neamah Mohsen** – e-mail: Mohammed.naima@gmail.com; 133, Universitetskiy, ap. 101, Rostov-on-Don, 344048, Russian; phone +79888938840; the department software of computers and automated systems; postgraduate student.

УДК 519.71

**Н.П. Воронова, С.М. Ковалев, А.Н. Шабельников**

### **ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЙ НЕЧЕТКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Традиционные подходы к управлению сложными динамическими объектами в условиях неопределенности опираются на их аналитические модели, представленные в виде дифференциальных или разностных уравнений. Однако, для слабо формализованных объектов, характеризующихся наличием множества НЕ-факторов, построение аналитических моделей не представляется возможным, поэтому предпочтение отдают интеллектуальным моделям, основанным на знаниях, важный класс которых составляют нечеткие динамические системы. В настоящей статье рассматривается решение основных задач, связанных с идентификацией, прогнозированием и оцениванием состояний НДС, описывающих поведение слабо формализуемых динамических объектов. Рассматривается новый подход к оцениванию состояний и идентификации параметров нечетких динамических систем, в основу рассматриваемого подхода положена адаптивная сетевая модель вычисления нечетких априорных и апостериорных оценок переменных состояния системы в смежные моменты времени и оптимизация параметров модели с использованием модифицированного симплексного алгоритма. Предложенный метод параметрической идентификации обладает также рядом принципиально новых свойств, к числу которых относится принципиальная возможность интеграции в систему эмпирических экспертных знаний, более высокий по сравнению с традиционными методами уровень потенциальной точности идентификации параметров модели за счет возможности использования обобщенных нечетких критериев оптимальности, а также возможность идентификации параметров модели в реальном масштабе времени за счет небольшого числа итераций, требующихся для оценки оптимальных значений параметров. Рассматривается пример оптимального оценивания параметров нечеткой динамической системы и приводятся результаты экспериментов. Экспериментальная проверка показала, что в большинстве случаев найденные на основе разработанного симплексного алгоритма оценки идентифицируемых параметров для широкого круга нечетких динамических систем типа Сугено отличаются от истинных значений не более чем на 10 %.*

*Нечеткая динамическая система; условная функция принадлежности; априорное нечеткое распределение; апостериорное нечеткое распределение; адаптивная сетевая модель; параметрическая идентификация.*

**N.P. Voronova, S.M. Kovalev A.N. Shabelnikov**

### **IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF STATES FOR FUZZY DYNAMICAL SYSTEMS**

*Conventional approaches to the control of complex dynamical objects in uncertainties are based on analytical models presented in form of differential and difference equations. However, the construction of analytical models is impossible for semi-formalized objects, when various non-factors are occurred. Because of this fact, intelligent models based on human expert knowledges are most preferable ones. Among these models, fuzzy dynamical systems play an important role. The paper*

*presents a decision of general tasks connected with identification, prediction and estimation of states for fuzzy dynamical systems describing the behavior of semi-formalized dynamical objects. A new approach to statement estimation and parameter identification for fuzzy dynamical systems is considered. The basis of the considered approach is adaptive network model of the computation of fuzzy prior and posterior estimates of system's state variables taking place in consequent time steps. Optimization of the model parameters is taking into account in the approach as well. Proposed technique for parameter identification has the set of fundamentally new properties. Among them, possibility of integration into a system of empirical expert knowledges, higher level of potential accuracy of identification based on possibility of utilizing the generalized fuzzy criteria of optimality and real-time identification of model parameters (because of small number of iterations required for optimal states estimation) are highlighted. An example of optimal parameter estimation for fuzzy dynamical system is considered and experimental results are presented. Experimental verification shows that estimates of identified parameters found based on developed simplex algorithm are not deviated from real values more than by 10 % in many cases for wide variety of fuzzy dynamical systems.*

*Fuzzy dynamical system; conditional membership function; prior fuzzy distribution; posterior fuzzy distribution; adaptive network model; parametric identification.*

**Введение.** Современные методы контроля и управления сложными динамическими объектами в условиях неопределенности опираются на их аналитические модели, представленные в виде дифференциальных или разностных уравнений. При этом, как показывает анализ публикаций [1–4], большинство исследований в данной области базируется на использовании традиционных методов, обладающих рядом ограничений, таких как требование подчиненности нормальным законам распределения плотностей вероятности, использование традиционных средне-квадратичных критериев оценки оптимальности параметров модели, использование простейших линейных моделей измерительных систем и др. При этом вопросы, касающиеся интеграции эмпирических знаний экспертов в слабо формализуемые модели процессов, характеризуемые неполнотой, неточностью и противоречивостью описаний [5], а также наличием нечетких и субъективных факторов, влияющих на оценку параметров объекта и наблюдателя, остаются, практически, не освещенными [6–8].

Для моделирования слабо формализуемых динамических объектов все чаще предпочтение отдают интеллектуальным моделям, основанным на знаниях, важный класс которых составляют нечеткие динамические системы (НДС) [2–4]. В основу построения НДС положена формализация эмпирического опыта и знаний специалистов-экспертов, представленных в лингвистической форме, средствами нечеткой логики. Для практического использования в системах управления требуется разработка эффективных методов построения и адаптации НДС, а также алгоритмов принятия решений на основе прогнозирования поведения НДС и оценивания их состояний.

В настоящей статье рассматривается решение основных задач, связанных с идентификацией, прогнозированием и оцениванием состояний НДС, описывающих поведение слабо формализуемых динамических объектов.

**1. Модель представления и оценивания состояний НДС.** Среди множества известных способов представления НДС дискретного времени [9–13] наиболее простым является задание НДС в виде разностного уравнения состояния:

$$x_{k+1} = F(x_k) \quad (k = 0, 1, \dots, N), \quad (1)$$

где  $X$  – пространство состояний НДС,  $F$  – нечеткое отображение  $X_k \rightarrow X_{k+1}$ . Нечеткое отображение  $F$  в (1) задается функцией принадлежности (ФП):  $\mu_F(x_k, x_{k+1})$ , которую в ряде случаев удобно рассматривать как условную ФП  $\mu_F(x_{k+1} | x_k)$ .

В реальных приложениях НДС рассматривается вместе с измерительной системой, осуществляющей преобразование внутренних состояний системы  $X$  во внешние наблюдаемые состояния (измерения)  $Z$ , а также с учетом шумовых процессов (помех), воздействующих на систему и измеритель. Поэтому практически полезная модель НДС представляется с учетом измерителя и нечетких помех в виде системы:

$$\begin{cases} x_{k+1} = F_k(x_k, \varepsilon_k); \\ z_k = S_k(x_k, \delta_k) \end{cases} \quad (k = 0, 1, \dots, N), \quad (2)$$

где  $F_k$  – уравнение состояния НДС;  $S_k$  – нелинейная функция измерителя;  $x_k$  – внутренние состояния системы;  $z_k$  – внешние измеренные состояния системы;  $\varepsilon_k$  – нечеткая помеха в системе с известной ФП  $\mu_{\varepsilon_k}$ ;  $\delta_k$  – нечеткая ошибка измерения с известной ФП  $\mu_{\delta_k}$ ;  $k$  – индекс дискретного времени.

Под множеством состояний  $X$  в (2) понимают совокупность величин, характеризующих положение НДС в данный момент времени и играющих роль начальных условий для описания будущего поведения системы. Однако, в реальности любая система характеризуется неопределенностью, а, следовательно, зависимость между значениями переменной для текущих и последующих состояний является нечеткой. Оценивание и корректировка этой зависимости при управлении динамическими объектами является важной задачей в области нечеткого моделирования, заключающейся в следующем.

На основе имеющейся априорной информации о начальном состоянии НДС, представленном в виде ФП  $\mu(x_0)$ , и наблюдаемых состояний на временном интервале  $[t_0, t_k]$ , представленным вектором наблюдений  $\bar{z}_k = (z_0, z_1, \dots, z_k)$ , требуется прогнозировать нечеткое состояние НДС  $x_{k+1}$  в момент времени  $t_{k+1}$ , представленное ФП  $\mu(x_{k+1})$ . Корректировка состояния НДС осуществляется путем уточнения ФП  $\mu(x_{k+1})$  для найденного нечеткого значения  $x_{k+1}$  при появлении нового наблюдения  $z_{k+1}$  в момент времени  $t_{k+1}$ .

**2. Рекуррентный алгоритм оценивания состояний НДС.** Оценивание и корректировку состояний НДС будем осуществлять на основе нахождения и сопоставления априорной и апостериорной информации, характеризуемой условными ФП  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k)$  и  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_{k+1})$ . Для вычисления условных ФП будем использовать описываемую ниже рекуррентную процедуру.

Рассмотрим общий случай нестационарной НДС с дискретным временем, представленной системой (2). Предполагается известной ФП  $\mu(x_0)$  для нечеткого начального состояния НДС. Ошибки измерения и помехи являются независимыми величинами в смысле определения независимости нечетких величин [14].

ФП  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_{k+1})$ , с учетом возможности представления вектора  $\bar{z}_{k+1}$  в виде  $\bar{z}_{k+1} = (\bar{z}_k, z_{k+1})$ , можно записать как

$$\mu(x_{k+1} | \bar{z}_{k+1}) = \mu(x_{k+1} | \bar{z}_k, z_{k+1}). \quad (3)$$

Условные нечеткие величины  $(x_{k+1} | \bar{z}_k)$  и  $(x_{k+1} | z_{k+1})$ , входящие в (3), являются независимыми, поскольку являются независимыми нечеткая помеха  $\mathcal{E}_k$ , действующая на НДС и определяющая нечеткую величину  $(x_{k+1} | \bar{z}_k)$ , и нечеткая помеха  $\delta_k$ , действующая на измеритель и определяющая нечеткую величину  $(x_{k+1} | z_{k+1})$ . Тогда в силу определения условной нечеткой величины и независимости  $(x_{k+1} | \bar{z}_k)$  и  $(x_{k+1} | z_{k+1})$  выражение (3) можно записать в виде

$$\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k, z_{k+1}) = \mu(x_{k+1} | \bar{z}_k) \& \mu(x_{k+1} | z_{k+1}). \quad (4)$$

Определим условные ФП, входящие в (4)

Условную ФП нечеткой величины  $(x_{k+1} | z_{k+1})$  можно выразить, используя уравнение измерителя (2), через ФП нечеткой помехи:

$$\mu(x_{k+1} | z_{k+1}) = \mu_{\delta_{k+1}}(S_{k+1}^{-1}(x_{k+1}, z_{k+1})). \quad (5)$$

Поскольку нелинейное отображение  $S_{k+1}^{-1}$  в (5), в общем случае, многозначное, нечеткая оценка для  $\mu_{\delta_{k+1}}(S_{k+1}^{-1}(x_{k+1}, z_{k+1}))$ , в силу принципа обобщения Заде [15] принимает наибольшее среди возможных значений:

$$\mu_{\delta_{k+1}}(S_{k+1}^{-1}(x_{k+1}, z_{k+1})) = \sup_{\Delta=S_{k+1}^{-1}(x_{k+1}, z_{k+1})} \mu_{\delta_{k+1}}(\Delta). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) получим окончательное выражение для условной ФП:

$$\mu(x_{k+1} | z_{k+1}) = \sup_{\Delta=S_{k+1}^{-1}(x_{k+1}, z_{k+1})} \mu_{\delta_{k+1}}(\Delta). \quad (7)$$

Условная ФП  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k)$ , входящая в (4), описывает нечеткое отображение  $\Phi: \bar{z}_k \rightarrow X_{k+1}$ , которое можно представить в виде композиции нечетких отображений:

$$\Phi = (\bar{z}_k \rightarrow X_k) \circ (X_k \rightarrow X_{k+1}). \quad (8)$$

Нечеткое отображение  $\bar{z}_k \rightarrow X_k$  характеризуется условной ФП  $\mu(x_k | \bar{z}_k)$ , а нечеткое отображение  $X_k \rightarrow X_{k+1}$  характеризуется условной ФП  $\mu(x_{k+1} | x_k)$ . В результате композиции ФП нечетких отображений  $\bar{z}_k \rightarrow X_k$  и  $X_k \rightarrow X_{k+1}$  получаем ФП  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k)$  для нечеткого отображения  $\Phi: \bar{z}_k \rightarrow X_{k+1}$ :

$$\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k) = \sup_{x_k} [\mu(x_k | \bar{z}_k) \& \mu(x_{k+1} | x_k)]. \quad (9)$$

Входящая в (9) ФП  $\mu(x_{k+1} | x_k)$  выражается через нечеткую помеху на основе уравнения состояния (2)

$$\mu(x_{k+1} | x_k) = \sup_{\Delta=F_k^{-1}(x_{k+1}, x_k)} \mu_{\mathcal{E}_k}(\Delta). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) получаем выражение для ФП  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k)$ :

$$\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k) = \sup_{x_k} [\mu(x_k | \bar{z}_k) \& \sup_{\Delta=F_k^{-1}(x_{k+1}, x_k)} \mu_{\mathcal{E}_k}(\Delta)]. \quad (11)$$

Окончательные рекуррентные соотношения для вычисления апостериорной ФП для нечеткого состояния НДС на произвольном шаге  $k$  с учетом (9) и (11) примут вид:

$$\begin{cases} \mu(x_{k+1} | \bar{z}_{k+1}) = \mu(x_{k+1} | \bar{z}_k) \& \sup_{\Delta=S_{k+1}^{-1}(x_{k+1}, z_{k+1})} \mu_{\delta_{k+1}}(\Delta); \\ \mu(x_{k+1} | \bar{z}_k) = \sup_{x_k} [\mu(x_k | \bar{z}_k) \& \sup_{\Delta=F_k^{-1}(x_{k+1}, x_k)} \mu_{\varepsilon_k}(\Delta)]. \end{cases} \quad (12)$$

Стартовой информацией для реализации рекуррентных уравнений (12) является условная ФП  $\mu(x_0 | z_0)$ , в качестве которой используется априорная ФП для начального нечеткого состояния  $\mu(x_0)$ , которая по условию задачи считается заданной.

**3. Оценивание оптимальных параметров НДС.** Оценивание параметров НДС при априорно заданной структуре является задачей параметрической идентификации, общая формулировка которой приведена ниже.

Пусть задана структура НДС в виде системы (2), в которой нелинейные функции состояния  $F_k$  и измерителя  $S_k$  для каждого момента времени  $t_k$  зависят от множества неизвестных параметров, представленных векторами  $A_k$  и  $B_k$  соответственно. В этом случае модель нестационарной НДС с неизвестными параметрами описывается системой:

$$\begin{cases} x_{k+1} = F_k(x_k, A_k, \varepsilon_k); \\ z_k = S_k(x_k, B_k, \delta_k) \quad (k = 0, 1, \dots, N). \end{cases} \quad (13)$$

Пусть известен ряд экспериментальных наблюдений за поведением системы на временном интервале  $[t_0, t_k]$ , представленный в виде вектора измерений  $\bar{z} = [z_0, z_{n+1}, \dots, z_k]$ . При заданных условиях требуется определить численные значения векторов параметров  $A_k$  и  $B_k$ , при которых поведение системы наиболее точно соответствует данным экспериментальных наблюдений.

Для формализации понятия “наиболее точно” вводится критерий качества идентификации, характеризующий меру соответствия модели НДС результатам экспериментальных наблюдений. Критерий качества идентификации определяется на основе сопоставления априорной ФП  $\mu(x_{k+1} | \bar{z}_k)$ , характеризующей нечеткую оценку переменной состояния  $X$  в момент времени  $t_k$  при условии наличия измеренного значения переменной состояния  $z_k$  в момент  $t_k$ , и апостериорной ФП  $\mu(x_{k+1} | z_{k+1})$ , характеризующей нечеткую оценку переменной состояния НДС в момент времени  $t_{k+1}$  при поступлении нового измерения  $z_{k+1}$ . Различия в априорной и апостериорной ФП характеризует нечеткую ошибку  $e_k$  оценивания текущего состояния НДС. ФП для нечеткой ошибки имеет вид:

$$\mu(e_k, A_k, B_k, B_{k+1}) = \sup_{x_{k+1}} \mu(x_{k+1} | z_k, A_k, B_k) \& \mu(x_{k+1} + e_k | z_{k+1}, B_{k+1}). \quad (14)$$

В качестве критерия качества идентификации  $J$  нечеткой системы, в принципе, может выступать любой нечеткий критерий, зависящий от условных и апостериорных ФП. В частности, представляется удобным использовать минимум отклонения ФП нечеткой ошибки оценивания  $e_k$  от заданной эталонной функции ошибки на выбранном интервале ее изменения  $[e_{\min}, e_{\max}]$  т.е.:

$$J_k(A_k, B_k, B_{k+1}) = \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} (r(e_k) - \mu(e_k | A_k, B_k, B_{k+1}))^2 de_k, \quad (15)$$

где  $e_k$  – текущая ошибка оценивания,  $\mu(e_k | A_k, B_k, B_{k+1})$  – ФП нечеткой ошибки оценивания, определяемая на основании (14);  $r(e_k)$  – эталонная функция, выбираемая исходя из специфики задачи.

Задача оценивания оптимальных параметров НДС заключается в нахождение значений векторов параметров  $A_k$  и  $B_k$ , доставляющих минимум критерию (15), т.е.:

$$\min_{A_k, B_k, B_{k+1}} J = \min_{A_k, B_k, B_{k+1}} \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} (r(e_k) - \mu(e_k | A_k, B_k, B_{k+1}))^2 de_k. \quad (16)$$

**4. Адаптивная сетевая модель НДС.** Вычисление условных ФП для нечетких состояний и оптимизация параметров НДС осуществляется с использованием рассматриваемой ниже адаптивной сетевой модели (АСМ) и итерационного алгоритма. В основу построения АСМ положен процесс вычисления априорной и апостериорной ФП нечетких состояний НДС для каждого момента времени на интервале наблюдений и их сопоставления на основе выбранного критерия оптимальности  $J$ .

Пусть в некоторый произвольный момент времени  $t_k$  на выходе НДС наблюдался выходной сигнал (измеренное состояние системы)  $z_k$ . Тогда, при условии наблюдения  $z_k$  в момент времени  $t_k$  нечеткое состояние НДС в момент времени  $t_{k+1}$  может быть определено на основе композиции нечеткого отображения  $S_k^{-1}: z_k \rightarrow X_k$ , определяемого уравнением измерителя в (13), и нечеткого отношения  $F_k: X_k \rightarrow X_{k+1}$ , определяемого уравнением состояния в (13). Условная ФП  $\mu(x_k | z_k)$  для нечеткого отображения  $S_k^{-1}$  определяется на основе уравнения измерителя с учетом нечеткого шума  $\delta_k$  следующим образом:

$$\mu(x_k | z_k, B_k) = \mu_{\delta_k}(S_k(x_k, B_k) - z_k). \quad (17)$$

Условная ФП  $\mu(x_{k+1} | x_k)$  для нечеткого отображения  $F_k$  определяется на основе уравнения состояния с учетом нечеткого шума  $\varepsilon_k$  следующим образом:

$$\mu(x_{k+1} | x_k, A_k) = \mu_{\varepsilon_k}(F_k(x_k, A_k) - x_{k+1}). \quad (18)$$

С учетом (17) и (18) условная ФП  $\mu(x_{k+1} | z_k)$  для нечеткой композиции  $S_k^{-1} \circ F_k$  имеет вид:

$$\mu(x_{k+1} | z_k, A_k, B_k) = \sup_{x_k} [\mu(x_k | z_k, B_k) \& \mu_{\varepsilon_k}(F_k(x_k, A_k) - x_{k+1})]. \quad (19)$$

Выражение (19) является априорной ФП, характеризующей нечеткое значение переменной состояния  $X$  при условии наблюдения  $z_k$  в момент времени  $t_k$ .

Для определения апостериорной ФП  $\mu(x_{k+1} | z_{k+1})$  предположим, что в момент времени  $t_{k+1}$  на выходе НДС появился выходной сигнал  $z_{k+1}$ . Тогда апостериорная ФП  $\mu(x_{k+1} | z_{k+1})$  для нечеткого значения переменной состояния  $X$  в мо-

мент времени  $t_{k+1}$  определится на основе уравнения измерителя в (13) с учетом нечеткого шума  $\delta_{k+1}$  следующим образом:

$$\mu(x_{k+1} | z_{k+1}, B_{k+1}) = \mu_{\delta_{k+1}}(S_{k+1}(x_{k+1}, B_{k+1}) - z_{k+1}). \quad (20)$$

Процесс вычисления априорной и апостериорной ФП вместе с критерием качества идентификации (15) отобразим в сетевую структуру, представляющую собой вычислительную сеть с прямым распространением сигнала (*feedforward*), приведенную ниже на рис. 1.

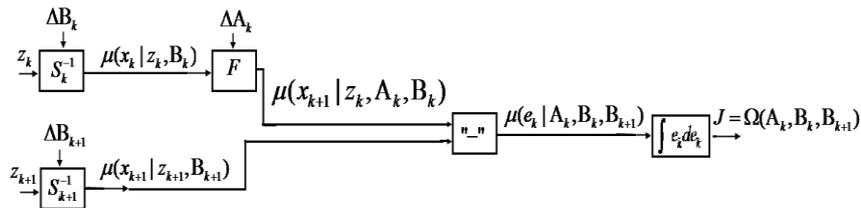


Рис. 1. Обобщенная структура АСМ

В приведенной на рис. 1 структуре АСМ каждый элемент сети реализует отдельный этап преобразований входных сигналов  $z_k$  и  $z_{k+1}$  в значения условных ФП  $\mu(x_{k+1} | z_k, B_k, A_k)$  и  $\mu(x_{k+1} | z_{k+1}, B_{k+1})$ . Выходной блок вычисляет значение критерия идентификации при заданных входных сигналах и числовых значениях векторов параметров  $A_k, B_k, B_{k+1}$ . Идентификация параметров НДС осуществляется путем подстройки неизвестных параметров НДС  $A_k$  и измерителя  $B_k$  и  $B_{k+1}$  с использованием итеративного градиентного метода *backpropagation* [16] и модифицированного симплексного метода Нелдера Мида [17].

**5. Пример.** Реализацию описанного метода рассмотрим на примере идентификации параметров НДС, представленной системой уравнений [18]:

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, a_{k-1}) + \varepsilon_k = a_{k-1} \cdot x_{k-1}^{1.7} + \varepsilon_k; \\ z_k = s(x_k) + \delta_k = b_k \cdot x_k^{1.2} + \delta_k, \end{cases} \quad (21)$$

где  $a_{k-1}$  – идентифицируемый параметр системы;  $b_k$  – параметр наблюдателя;  $\varepsilon_k$  – нечеткий шум в системе, представленный гауссовской ФП с нулевым средним и дисперсией  $D_\varepsilon = 0.5$ ;  $\delta_k$  – нечеткий шум в измерителе, представленный гауссовской ФП с нулевым средним и дисперсией  $D_\delta = 0.22$ .

Истинное значение идентифицируемого параметра  $a_k$  выбрано равным 2, а параметра наблюдателя  $c_k$  – равным 1.2 для всех  $k$ . ФП нечеткого шума в системе имеет вид:

$$\mu(\varepsilon_k) = \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot 0,5} \cdot \varepsilon_k^2\right).$$

ФП нечеткого шума в измерителе имеет вид:

$$\mu(\delta_k) = \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot 0,22} \delta_k^2\right).$$

В качестве критерия качества идентификации  $J$  выступает критерий минимума отклонения ФП нечеткой ошибки оценивания  $e_k$  от эталонной функции ошибки  $r(e_k)$ :

$$J = \min_{a_k} \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} (r(e_k) - \mu(e_k, a_k))^2 de_k.$$

Эталонная функция ошибки определена на интервале ее изменения  $- [e_{\min}, e_{\max}] = [-1, 1]$ , следующим образом:

$$\begin{cases} r(e) = e + 1 & \text{при } -1 \leq e < 0; \\ r(e) = -e + 1 & \text{при } 0 \leq e \leq 1. \end{cases}$$

Начальное значение переменной состояния  $x_0$  принято равным 0.8. Вычисление функции  $\sup_{x_k} (*)$  производилось численно с шагом дискретизации  $\Delta = 0.05$  для переменной  $X$ . Вычисление интеграла в критерии (15), также производилось численно с использованием квадратурных формул с шагом  $\Delta = 0.05$ . Бесконечные пределы интегрирования по переменной состояния  $X$  были заменены на конечные значения, удовлетворяющие точностным требованиям к алгоритму оценки ( $x_{\min} = 0$ ,  $x_{\max} = 4$ ).

Оптимизация параметра  $a_{k-1}$  осуществлялась с использованием АСМ и модифицированного симплексного метода Нелдера Мида, обеспечивающего в рассматриваемом случае удовлетворительную скорость решения и требуемую точность результатов. Имитация шумов в системе и измерителе проводилась программным методом, входящим в стандартный набор среды математических вычислений *Mathematica*.

Результаты вычислений приведены ниже на рисунках. На рис. 2 приведен график зависимости интегрального критерия  $J$  от идентифицируемого параметра  $a_k$  для  $k=37$ . На графике видно, что минимум критерия располагается вблизи истинного значения искомого параметра  $a_k = 2$ .

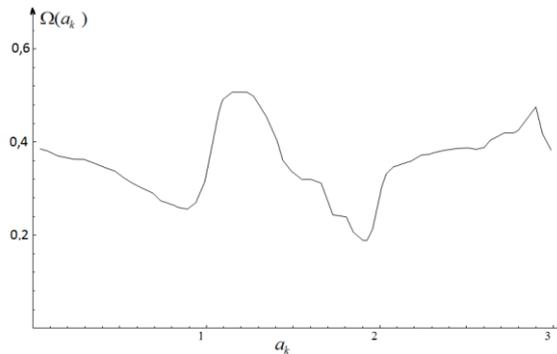


Рис. 2. График зависимости интегрального критерия  $J$  от идентифицируемого параметра  $a_k$  для  $k=37$

На рис. 3 представлена зависимость искомого параметра  $a_k$  от номера итерации  $k$  алгоритма Нелдера-Мида. Из графика следует, что по мере увеличения числа итераций  $k$  (для рассматриваемого примера  $k > 35$ ), численное значение параметра идентификации стремится к его истинному значению и отличается от него не более чем на 10 %.

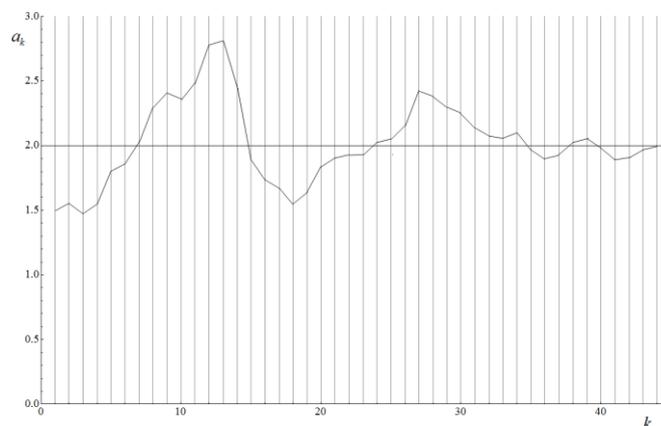


Рис. 3. Зависимость значений оценки идентифицируемого параметра от номера итерации алгоритма

Для экспериментальной проверки эффективности предложенного подхода к идентификации НДС на основе АСМ была проведена серия из 400 экспериментов, аналогичных рассмотренному примеру. В качестве НДС выступали нечеткие модели Сугено [19] с различным числом неизвестных параметров, варьируемых от 3 до 9. Структурная оптимизация нечетких моделей осуществлялась на основе генетического алгоритма [20]. Результаты показали, что для большинства примеров (более 95 %) найденные на основе АСМ оценки вектора идентифицируемых параметров отличаются от истинных значений не более чем на 10 %. Также было установлено, что для большинства примеров идентифицируемые параметры НДС сходятся к их приближенным истинным значениям после 20–30 итераций работы алгоритма. Небольшое число итераций алгоритма, требующихся для идентификации параметров НДС с допустимой точностью, дает возможность использовать АСМ для параметрической идентификации НДС в режиме реального времени.

**Заключение.** В статье предложен новый подход к оцениванию состояний и идентификации параметров нечетких систем, описывающих динамику слабо формализованных процессов, с использованием адаптивной сетевой модели и модифицированного симплексного алгоритма. Экспериментальная проверка предложенного подхода к идентификации НДС показала, что в большинстве случаев найденные на основе АСМ и модифицированного симплексного алгоритма оценки идентифицируемых параметров для широкого круга нечетких динамических систем типа Сугено отличаются от истинных значений не более чем на 10 %. Предложенный метод параметрической идентификации обладает также рядом принципиально новых свойств, к числу которых относится принципиальная возможность интеграции в систему экспертных знаний, более высокий по сравнению с традиционными методами уровень потенциальной точности идентификации параметров модели за счет возможности использования обобщенных нечетких критериев оптимальности, а также возможность идентификации параметров модели в реальном масштабе времени за счет небольшого числа итераций, требующихся для оценки оптимальных значений параметров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грон Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
3. Пащенко Ф.Ф. Введение в состоятельные методы моделирования систем. Идентификация нелинейных систем. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 288 с.

4. *Ronghua Guo*. Interacting Multiple Model Particle-type Filtering Approaches to Ground Target Tracking // *Journal of Computers*. – 2008. – Vol. 3, No. 7. – P. 23-30.
5. *Поспелов Д.А.* Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Энергоиздат, 1981. – 230 с.
6. *Gordon N.J., Salmond D.J., Smith A.F.M.* Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation // *IEE Proceedings-F*. – 1993. – Vol. 140, No. 2. – P. 107-113.
7. *Doucet A., Godsill S., Andrieu C.* On sequential Monte-Carlo sampling methods for Bayesian filtering // *Statistics and Computing*. – 2000. – Vol. 10, No. 3. – P. 197-208.
8. *Штейнберг Ш.Е.* Идентификация в системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.
9. *Кудинов Ю.И., Кудинов И.Ю., Суслова С.А.* Нечеткие модели динамических процессов. – М.: Научная книга, 2007. – 183 с.
10. *Ковалев С.М.* Интеллектуальные модели анализа временных рядов на основе нечетко-динамических систем // Труды Междунар. научн.-техн. Конференций “Интеллектуальные системы” (AIS’06) и “Интеллектуальные САПР” (CAD-2006): Научное издание в 3-х т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2006. – С. 93-99.
11. *Алтунин А.Е., Семухин М.В.* Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. – Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. – 352 с.
12. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др. / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
13. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В.* Теория моделей в процессах управления. – М.: Наука, 1978. – 216 с.
14. *Лю Б.* Теория и практика неопределенного программирования: пер с англ. – Б. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 416 с.
15. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
16. *Werbos P.J.* Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Ph.D. thesis, Harvard University, Cambridge, MA, 1974.
17. *Nelder J.A. and Mead R.* A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. – 1965. – Vol. 7. – P. 308-313.
18. *Ковалев С.М., Кучеренко П.А., Соколов С.В.* Интеллектуальная обработка темпоральных данных на основе гибридных нечетко-стохастических моделей // *Автоматика и вычислительная техника*. – 2015. – № 1. – С. 5-17.
19. *Sugeno M. Yasukawa T.* A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 1993. – Vol. № 1. – P. 7-31.
20. *Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.

#### REFERENCES

1. *Grop D.* Metody identifikatsii sistem [The methods for system identification]. Moscow: Mir, 1979, 302 p.
2. *Lyung L.* Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya [System identification. Theory for user]. Moscow: Nauka, 1991, 432 p.
3. *Pashchenko F.F.* Vvedenie v sostoyatel'nye metody modelirovaniya sistem. Identifikatsiya nelineynykh system [Introduction to wealthy methods of system modeling. Autentification of nonlinear systems]. Moscow: Finansy i statistika, 2007, 288 p.
4. *Ronghua Guo*. Interacting Multiple Model Particle-type Filtering Approaches to Ground Target Tracking, *Journal of Computers*, 2008, Vol. 3, No. 7, pp. 23-30.
5. *Pospelov D.A.* Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemakh upravleniya [Logical-linguistic models in control systems]. Moscow: Energoiz-dat, 1981, 230 p.
6. *Gordon N.J., Salmond D.J., Smith A.F.M.* Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, *IEE Proceedings-F*, 1993, Vol. 140, No. 2, pp. 107-113.
7. *Doucet A., Godsill S., Andrieu C.* On sequential Monte-Carlo sampling methods for Bayesian filtering, *Statistics and Computing*, 2000, Vol. 10, No. 3, pp. 197-208.
8. *Shteynberg Sh.E.* Identifikatsiya v sistemakh upravleniya [Identification in control systems]. Moscow: Energoatmoizdat, 1987, 80 p.

9. *Kudinov Yu.I., Kudinov I.Yu., Suslova S.A.* Nechetkie modeli dinamicheskikh protsessov [Fuzzy models of dynamical processes]. Moscow: Nauchnaya kniga, 2007, 183 p.
10. *Kovalev S.M.* Intellectual'nye modeli analiza vremennykh ryadov na osnove nechetko-dinamicheskikh sistem [Intelligent models for time-series analysis based on Fuzzy Dynamical Systems], *Trudy Mezhdunar. nauchn.-tekh. Konferentsiy "Intellectual'nye sistemy" (AIS'06) i "Intellectual'nye SAPR" (CAD-2006): Nauchnoe izdanie v 3-kh t. T. 1* [Proceedings of the International scientific and technical Conferences "Intellectual systems" (AIS'06) and "Intelligent CAD" (CAD-2006): Scientific publication in 3 vol. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit, 2006, pp. 93-99.
11. *Altunin A.E., Semukhin M.V.* Modeli i algoritmy prinyatiya resheniy v nechetkikh usloviyakh [Models and algorithms of decision-making in fuzzy conditions]. Tyumen': Izd-vo TGU, 2000, 352 p.
12. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy systems]: translated from Japanese K. Asai, D. Vatada, S. Ivai i dr., under ed. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno. Moscow: Mir, 1993, 368 p.
13. *Petrov B.N., Ulanov G.M., Gol'denblat I.I., Ul'yanov S.V.* Teoriya modeley v protsessakh upravleniya [The theory of models in control processes]. Moscow: Nauka, 1978, 216 p.
14. *Lyu B.* Teoriya i praktika neopredelenного программирования [Theory and practice of uncertain programming]: translation from English. – В. BINOM: Laboratoriya znaniy, 2014, 416 p.
15. *Zade L.A.* Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate-located solutions]. Moscow: Mir, 1976, 165 p.
16. *Werbos P.J.* Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Ph.D. thesis, Harvard University, Cambridge, MA, 1974.
17. *Nelder J.A. and Mead R.* A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 1965, Vol. 7, pp. 308-313.
18. *Kovalev S.M., Kucherenko P.A., Sokolov S.V.* Intellectual'naya obrabotka temporal'nykh dannyykh na osnove gibridnykh nechetko-stokhasticheskikh modeley [Intelligent processing of temporal data based on hybrid fuzzy stochastic models], *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika* [Automation and Computer Engineering], 2015, No. 1, pp. 5-17.
19. *Sugeno M. Yasukawa T.* A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling, *IEEE. Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, Vol. No. 1, pp. 7-31.
20. *Emel'yanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Целых.

**Ковалев Сергей Михайлович** – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: ksm@real36.com; 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г; тел.: 89612687722; кафедра автоматизации и телемеханики на ж. д. транспорте; д.т.н.; профессор.

**Воронова Наталья Павловна** – кафедра теоретических основ электротехники; к.т.н.; доцент.

**Шабельников Александр Николаевич** – кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

**Kovalev Sergey Mihailovich** – Rostov State University of Transport; e-mail: ksm@real36.com; 2 g, pl. Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +79612687722; the department of automation and remote control at the railway on transport; dr. of eng. sc.; professor.

**Voronova Nataliya Pavlovna** – the department of theoretical foundations elektrototekhniki; associate professor.

**Shabelnikov Aleksandr Nikolajevich** – the department of of computer science; dr. of eng. sc.; professor.

## Раздел IV. Вычислительная техника и электроника

УДК 621.3.049.771.14

**С.В. Гаврилов, Д.И. Рыжова, А.Л. Стемповский**

### **МАРШРУТ ЛОГИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ ДЛЯ КМОП ТЕХНОЛОГИЙ С ТРЕХМЕРНЫМ ЗАТВОРОМ ТРАНЗИСТОРА**

*С уменьшением технологических размеров базовых элементов возрастает влияние негативных короткоканальных эффектов в транзисторах и, как следствие, деградация электрических параметров транзисторов становится все более ощутимой. Это, в свою очередь, приводит к необходимости разработки альтернативных технологических решений, которые лучше масштабируются и совместимы с производственным процессом КМОП технологии. Одним из перспективных подходов в этой области является синтез топологии КМОП схем с технологией трехмерного затвора транзистора (FinFET). Преимуществами этой технологии являются низкая чувствительность к эффектам короткого канала транзистора и низкие подпороговые утечки. На сегодняшний день отсутствуют средства САПР для полностью автоматического синтеза топологии схем на основе FinFET структур, так как при переходе к технологиям 22 нм и ниже значительно увеличивается число конструкторско-технологических правил и ограничений. Переход к использованию регулярных структур в нижних слоях топологии позволяет решить проблемы возрастающего числа проектных норм для технологий 22 нм и ниже. В работах компании Intel для соблюдения требований регулярности в системах автоматизированного проектирования заказных микросхем предлагается подход к проектированию регулярных топологических структур с использованием конструкции специального типа – так называемого транзисторного шаблона. Данная работа представляет собой дальнейшее развитие идеи использования регулярности топологических структур в системах автоматизированного проектирования заказных микросхем. Отличительная особенность предлагаемого подхода состоит в независимом синтезе pull-up и pull-down цепей с использованием графа вложенности последовательно-параллельных структур (SP-граф). Это обеспечивает дополнительные степени свободы для достижения требуемых значений характеристик схемы по площади, быстродействию и потребляемой мощности по сравнению со стандартными подходами на основе предопределенных библиотек элементов. В данной работе также предложен маршрут автоматизации проектирования библиотечных элементов и блоков для КМОП технологий с трехмерным затвором транзистора, позволяющий минимизировать площадь конечной топологии с сохранением нужной точности задержек.*

*SP-граф; сложно-функциональный блок (СФ-блок); FinFET транзисторы (транзисторы с трехмерной структурой в форме плавника); КМОП технология.*

**S.V. Gavrilov, D.I. Ryzhova, A.L. Stempkovskiy**

### **THE FLOW OF THE LOGICAL AND PHYSICAL SYNTHESIS OF COMBINATIONAL CIRCUITS FOR CMOS TECHNOLOGY WITH 3D STRUCTURE OF THE TRANSISTOR**

*With a decrease in the technological size of the basic elements, the negative impact of short-channel effects in the transistor increases and the electrical transistors parameters of degradation becomes more noticeable. This leads to the development of alternative technical solutions, it can be scaled and it is compatible with CMOS manufacturing process. One of the most perspective approaches in this area is the synthesis of the CMOS circuits layout with three-dimensional tran-*

*istor gate technology (FinFET, Fin Field Effect Transistor). The advantages of this technology are the low sensitivity to the short-channel effects in the transistor and a low subthreshold leakage. Today the CAD tools for fully automated synthesis of circuit layout based on FinFET structures are absent, as the number of design rules and constraints on technology 22 nm and below is significantly increased. We use regular structures in the lower layers of the layout. It allows us to solve the problem of the increasing number of design rules for 22 nm technology and below. In the Intel company an approach to the design of regular topological structures using a special construction (so-called transistor pattern) for compliance with the requirements of regularity in the computer-aided design (CAD) systems is proposed. This work represents a further development of the idea of use the regularity of topological structures in CAD systems for ASIC design. A distinctive feature of the proposed approach is the independent synthesis of pull-up and pull-down chains using nesting graph of series-parallel structures (SP-graph). It provides an additional degree of freedom to achieve desired values of the area, performance and power consumption of circuit compared to standard approaches based on pre-defined library of elements. In this paper, the design automation flow for CMOS technology with 3D structure of the transistor is proposed. This flow allows to obtain the required accuracy of delays and minimize the final layout area.*

*SP-DAG (serial-parallel directed acyclic graph); CAD (computer-aided design); IP-block; FinFET transistor; CMOS technology.*

**Введение.** Темпы развития производства интегральных схем (ИС) за последние несколько лет начали опережать прогнозы, которые были сделаны в конце прошлого века и нашли выражение в так называемом законе Мура [1]. При переходе к технологическим нормам менее 100 нм стало очевидно, что дальнейшее следование закону Мура невозможно без привлечения новых технологических решений. Развитие технологий производства ИС связано с задачей постоянного уменьшения геометрических параметров транзисторов, которая до недавних времен решалась с помощью технологических методов масштабирования планарных транзисторов. Однако с уменьшением технологических размеров базовых элементов усиливаются негативные коротко-канальные эффекты [2–4] и, как следствие, деградация электрических параметров транзисторов становится все более ощутимой. Указанная проблема приводит к необходимости разработки перспективных решений, таких как КМОП технология с трехмерным затвором транзистора. В зарубежной литературе используется термин FinFET (Fin Field Effect Transistor, транзистор с трехмерной структурой в форме плавника). Экспериментальные результаты показывают, что FinFET транзисторы демонстрируют существенные преимущества с точки зрения скорости, эффективности и потребления мощности в нанометровом режиме [5].

Весной 2012 года компания Intel выпустила на рынок микропроцессоры с применением FinFET технологии, которые были изготовлены по технологическим нормам 22 нм [6]. В настоящее время ведущие производители СБИС активно используют техпроцессы с размерами транзисторов 16 нм и ниже. САПР Synopsys, Cadence и Mentor Graphics уже поддерживают проектирование перспективных технологий с вертикальным затвором транзистора.

Для современных технологических процессов технологические нормы и правила проектирования значительно усложнились из-за увеличения степени интеграции микросистем и уменьшения технологических размеров базовых элементов. Количество технологических правил и ограничений для технологий 28 нм и ниже составляет несколько тысяч ограничений, для FinFET технологии их количество еще больше в силу использования новых технологических решений, таких как метод двойного формирования рисунка (double patterning), формирование рисунка со спейсерами (spacer patterning) и т.д.

Использование регулярных структур в некоторых слоях топологии позволяет в определенной степени решить проблемы возрастающего числа норм проектирования. Кроме того, разработка топологии базовых элементов с регулярными структурами в слоях поликремния и диффузии дает возможность значительно упростить и ускорить проверку правил проектирования во время разработки общего вида топологии.

Многие передовые компании все больше внимания уделяют развитию методов проектирования регулярных структур. Например, компания Intel предлагает метод проектирования регулярных топологических структур на основе так называемых транзисторных шаблонов, которые являются промежуточными конструкциями между транзистором и стандартной ячейкой [7]. Однако такая конструкция использует не все возможности КМОП технологии с трехмерным затвором транзистора и не является самой оптимальной по площади. Стоит отметить, что новые технологические решения современных производителей позволяют формировать регулярные структуры эффективнее, сохраняя при этом сравнительно больше степеней свободы, и тем самым уменьшают площадь конечной топологии.

Для решения указанных проблем были разработаны новые методы и алгоритмы, обеспечивающие согласованное решение проблем логического и топологического синтеза схемы на логико-временном уровне анализа и позволяющие предварительно оценить характеристики библиотечных элементов и блоков.

**1. Метод разработки топологии регулярных структур на основе выбора топологического шаблона и технологии режущих слоев.** В данной работе в качестве альтернативы стандартным ячейкам и отдельным транзисторам [8] вводится функциональный элемент специального типа. Данные логические элементы строятся на основе произвольного фрагмента регулярной топологии. Такая конструкция состоит из транзисторов, относительное расположение которых известно на этапе логического синтеза, что упрощает этап физического синтеза по сравнению с подходами на отдельных транзисторах.

Для FinFET технологии с трехмерным затвором транзистора требуется однородность и регулярность в нижних слоях поликремния и диффузии для реализации транзисторов. К регулярным слоям диффузии обычно относятся сильнолегированные области  $p^+$  или  $n^+$  типа, равномерно расположенные слои поликремния для затворов транзисторов и межслойные переходы (рис. 1).

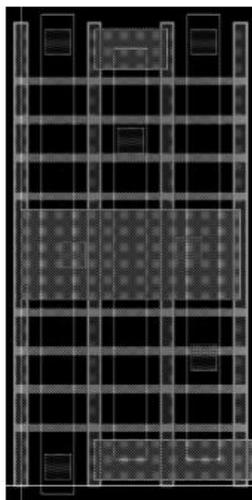


Рис. 1. Двухходовой И-НЕ на основе топологического шаблона TG-FinFET 16нм

В качестве общего вида регулярной топологии рассматривается структура с выровненными полосами сильнолегированных областей  $p^+$  или  $n^+$  типа, фиксированной ширины и с периодически меняющимися длинными и короткими затворами. Длинный затвор одновременно управляет  $p$  и  $n$  транзисторами, в то время как короткий затвор управляет только одним транзистором. Получающиеся таким образом

последовательно соединенные транзисторы формируют ряды; каждый ряд имеет инвертированный порядок  $p+$  и  $n+$  полос по отношению к соседнему ряду, чтобы использовать общий проводник питания для двух соседних полос одного типа.

Базовый шаблон регулярной топологии состоит из двух функциональных затворов, двух изолирующих затворов для верхней цепи из  $p$ -канальных транзисторов (далее PU – pull-up) и двух изолирующих затворов для нижней цепи из  $n$ -канальных транзисторов (далее PD – pull-down). После каждой пары входов, подключенных к функциональным затворам, будет стоять изолирующий затвор (темно серые затворы на рис. 2). Изолирующие затворы для  $p$ -канальных транзисторов сверху подключены к питанию, а для  $n$ -канальных транзисторов снизу к земле. Следует отметить, что для выбранного шаблона топологии контакты к изолирующим затворам не будут влиять на высоту конструкции так как, в отличие от контактов к коротким функциональным затворам, эти контакты ставятся непосредственно под шинами питания.

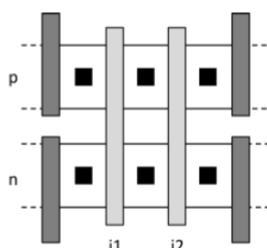


Рис. 2. Шаблон регулярной топологии

Одним из преимуществ предложенного топологического шаблона является отличная совместимость с комплементарными конструкциями, которые легко можно представить с помощью логических операций конъюнкции и дизъюнкции при построении графовой модели базовых блоков [9–13].

Также одним из эффективных методов формирования топологии FinFET структур является подход на основе режущих слоев (cut layers). В данной работе был разработан метод синтеза регулярной топологии с внедрением особого PCUT слоя – аналога режущего слоя, который применяется лидирующими производителями (например, компания TSMC). PCUT слой позволяет регулировать длину затвора и тем самым синтезировать топологию любой схемы без выбора топологического шаблона (рис. 3).

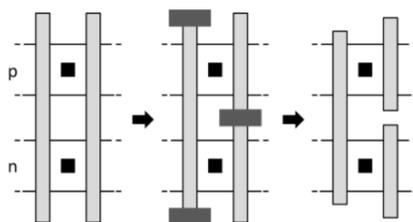


Рис. 3. Пример использования режущего слоя

По сравнению с использованием регулярных шаблонов без PCUT слоя, этот метод позволяет эффективнее размещать функциональные блоки, сокращать число изолирующих затворов и площадь за счет общих областей диффузии (рис. 4). Основным недостатком данного подхода является то, что не все технологические процессы поддерживают технологию режущих слоев.

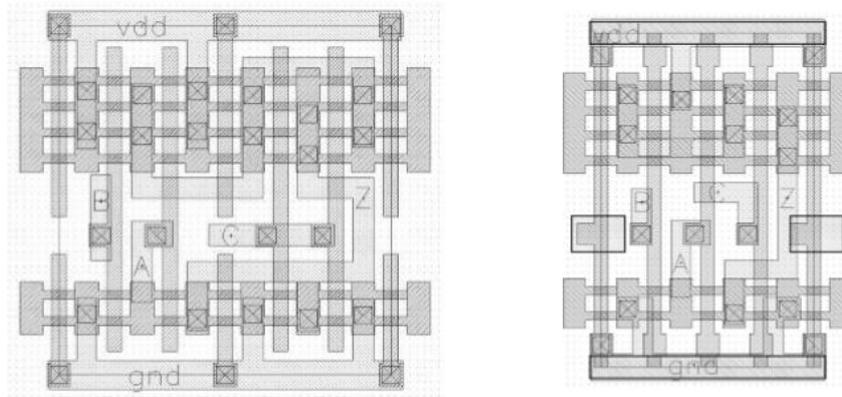


Рис. 4. Ячейка И-ИЛИ-НЕ21 (слева направо): синтез регулярной структуры на топологическом шаблоне, синтез с применением PCUT слоя

**2. Разработка теоретико-графовой модели логического элемента для логико-топологического синтеза.** Как уже было отмечено, регулярность структуры не только упрощает верификацию топологии, но и позволяет с помощью особых теоретико-графовых моделей получать согласованное решение проблем синтеза схемы и топологии на логико-временном уровне анализа. Особенность данного подхода заключается в независимом синтезе pull-up и pull-down цепей с использованием графа вложенности последовательно-параллельных структур (SP-DAG) [14–17]. В данной статье предложена модификация SP-графа, которая кроме описания логики схемы [18–20] также представляет модель ее транзисторного описания на уровне топологии (рис. 5).

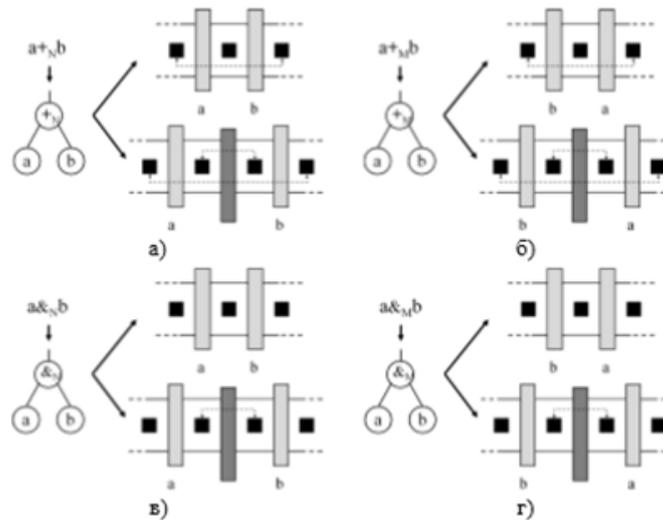


Рис. 5. Набор функций для описания топологической структуры: а – дизъюнкция в направлении  $N$ ; б – дизъюнкция в направлении  $M$ ; в – конъюнкция в направлении  $N$ ; г – конъюнкция в направлении  $M$

Выходы цифровой схемы обозначаются как корневые вершины SP-графа, входы – это его листья. Вся схема представлена как совокупность двух поддеревьев путей, которые соответствуют установке значений логической единицы и логи-

ческого нуля на выходе. Листья графа представляют собой затворы P (обозначены с отрицанием) и N (обозначены без отрицания) транзисторов. При этом SP-графы для нижней цепи PD и верхней цепи PU транзисторов описываются отдельно.

Задача описания функций на уровне топологии усложняется требованием взаимной однозначности между топологией и графовым деревом. Для обеспечения такой однозначности выбирается направление размещения транзисторов внутри топологии – слева направо или справа налево. Так, функция конъюнкции разделяется на конъюнкцию направо или налево, функция дизъюнкции – на дизъюнкцию направо или налево.

Предлагается выбрать одно нормальное направление и противоположное ему направление. Так, если порядок транзисторов в топологии соответствует выбранному направлению, то к оператору добавляется значок N (normal), если порядок противоположный, то M (mirror). Кроме выбора направления размещения транзисторов в последовательно-параллельных соединениях, выбирается ориентация каждого отдельного транзистора. В качестве нормального считается направление от истока к стоку. Каждый вход в описании индексируется латинскими буквами N, M. В данной работе такую модификацию SP-графа предлагается называть SP-NM-графом.

В качестве примера с помощью функций  $\&_N$ ,  $\&_M$ ,  $+_N$ ,  $+_M$  и  $\sim$  можно синтезировать топологию ячейки И-ИЛИ-НЕ21. Алгоритм синтеза топологии с FinFET технологией на основе теоретико-графовой модели включает следующие шаги:

- 1) Формирование формулы функции:

$$f = \overline{(A \& B) + C}.$$

- 2) Описание функции для PU и PD частей в виде SP-DAG (рис. 6). На этом этапе решается, в какой последовательности по направлению от земли/питания будут стоять функциональные затворы, которые подключены к соответствующим входам (аргументам функций).

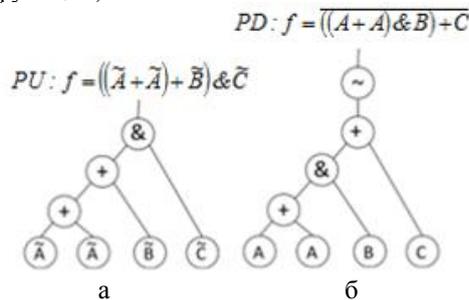


Рис. 6. SP-DAG для схемы И-ИЛИ-НЕ21: а – для цепи питания; б – для цепи земли

- 3) Выбор направления размещения или направления функций (рис. 7).

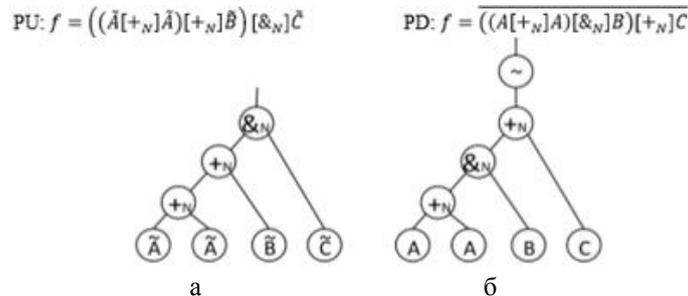


Рис. 7. Аннотация вершин логических функций графа: а – для цепи питания; б – для цепи земли

4) Выбор направления каждого транзистора (рис. 8).

$$PU: f = ((\bar{A}_N[+_N]\bar{A}_M)[+_N]\bar{B}_N)[\&_N]\bar{C}_N \quad PD: f = ((A_N[+_N]A_M)[\&_N]B_N)[+_N]C_M$$

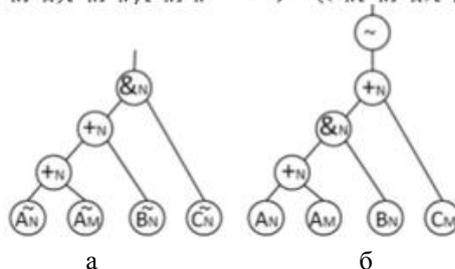


Рис. 8. Полная аннотация графа: а – для цепи питания; б – для цепи земли

5) Получение топологии из графа (рис. 9).

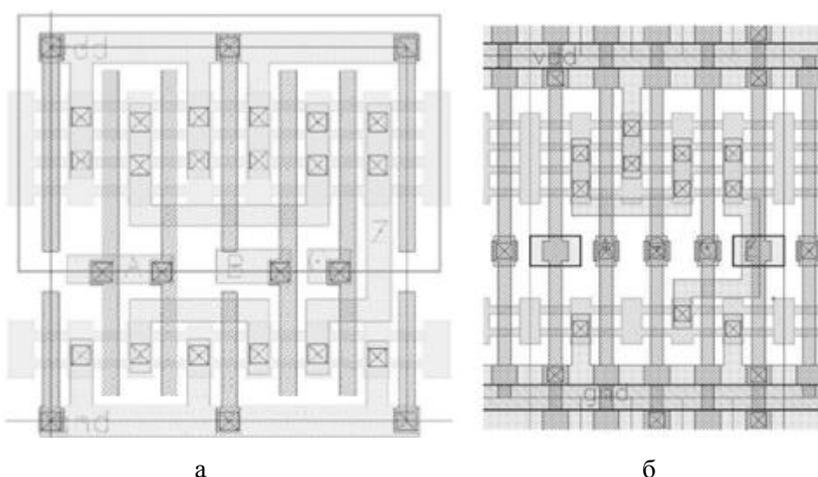


Рис. 9. Топология ячейки И-ИЛИ-НЕ21 на основе топологического шаблона без режущих слоев (а) и с PCUT слоем (б)

**3. Маршрут автоматизации проектирования библиотечных элементов и блоков для КМОП технологий с трехмерным затвором транзистора.** Разработанный маршрут проектирования схем на основе логико-топологического синтеза библиотечных элементов и блоков включает следующие этапы:

- 1) Формирование графовой модели схемы (SP-DAG) из логического или транзисторного описания схемы.
- 2) Формирование SP-NM-графа из SP-DAG с учетом топологического описания схемы на транзисторном уровне.
- 3) Логико-топологический синтез базовых элементов – построение топологии с помощью теоретико-графовой модели и выбранного метода формирования топологии. Данный этап включает размещение транзисторов из SP-NM-графа и трассировку внутренних соединений.
- 4) Характеризация синтезированных блоков – SPICE моделирование всех блоков, составляющих исходную схему.
- 5) Физический синтез схемы – трассировка внутренних соединений и формирование конечной топологии схемы.

Маршрут включает этапы логического и физического синтеза, без этапов системного и функционального проектирования.

**4. Результаты численных экспериментов.** Разработанный маршрут был интегрирован в САПР Cadence и протестирован на наборе тестовых схем ISCAS85 с использованием одной из новейших FinFET технологий с проектной нормой 16 нм. По результатам исследования был проведен сравнительный анализ занимаемой площади схем, спроектированных по маршруту на стандартных ячейках и по маршруту формирования регулярных структур на основе транзисторных шаблонов с режущими PCUT слоями и без. Анализ показал, что разработанные методы позволяют сократить площадь элемента до 23 % (табл. 1, 2).

Таблица 1

**Сравнительный анализ занимаемой площади схем, спроектированных по маршруту на основе стандартных ячеек и по маршруту формирования регулярных структур на основе транзисторных шаблонов без PCUT слоев**

Схема	Традиционный маршрут (площадь $\mu^2$ )	Предложенный маршрут (площадь $\mu^2$ )	Выигрыш по площади (%)
c17	2.281	2.84256	-24.6
c432	42.561	40.88448	3.9
c499	91.446	79.10784	13.5
c1355	87.765	78.7752	10.2
c1908	92.483	81.92016	11.4
c2670	126.852	110.13408	13.2

Таблица 2

**Сравнительный анализ занимаемой площади схем, спроектированных по маршруту на основе стандартных ячеек и по маршруту формирования регулярных структур на основе транзисторных шаблонов с PCUT слоями**

Схема	Традиционный маршрут (площадь $\mu^2$ )	Предложенный маршрут (площадь $\mu^2$ )	Выигрыш по площади (%)
c17	2.281	2.35872	11.4
c432	42.561	32.81472	22.9
c499	91.446	70.32096	23.1
c1355	87.765	69.15456	21.2
c1908	92.483	72.65376	21.4
c2670	126.852	97.848	22.9

Также было проведено сравнение синтезированных библиотечных элементов со стандартными ячейками, которые обладают аналогичной функциональностью и электрическими характеристиками. Сравнение показало, что предложенные методы логико-топологического синтеза позволяют сократить площадь блока от 5 до 15 % по сравнению со стандартными ячейками.

**Заключение.** Результаты проведенных экспериментов логико-топологического синтеза библиотечных элементов и блоков показали, что применение разработанных в данной работе методов формирования топологии базовых элементов для КМОП технологий с трехмерным затвором транзистора позволяет уменьшить площадь конечной топологии на 10–23 % по сравнению с традиционным маршрутом на основе производственной библиотеки стандартных ячеек.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Moore G.E. No Exponential is Forever: But “Forever” Can Be Delayed! // Digest of Technical Papers of IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2003. – P. 20-23.
2. Natori K. Ballistic metal-oxide-semiconductor field effect transistor // Journal of Applied Physics. – 1994. – Vol. 76, No. 8. – P. 4879-4890.
3. Гаврилов С.В., Иванова Г.А. Анализ быстродействия сложных цифровых схем с учетом неопределенности технологических и схемных параметров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – Вып. 53. – С. 29-35.
4. Гаврилов С.В., Гудкова О.Н. Логико-временной анализ надежности цифровых СБИС с учетом эффектов деградации NBTI и HCI // III Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2008”: сб. научн. тр. / под общей ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2008. – С. 30-35.
5. FinFET: The Promises and the Challenges // Synopsys, Inc. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/COMPANY/PUBLICATIONS/SYNOPSYSINSIGHT/Pages/Art2-finfet-challenges-ip-IssQ3-12.aspx>.
6. 3D, 22 nm: New Technology Delivers An Unprecedented Combination of Performance and Power Efficiency // Intel corporation. – Режим доступа: <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/intel-22nmtechnology.html>.
7. Талалай М.С., Трушин К.В., Венгер О.В. Логический синтез комбинационных схем на основе транзисторных шаблонов с регулярной топологией // Информационные технологии. – 2011. – № 4 (176). – С. 2-7.
8. Michael J.S. Smith Application-Specific Integrated Circuits // VLSI Design Series. – 1997.
9. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Стемпковский А.Л. Теоретико-графовая модель сложно-функциональных блоков для КМОП технологий с трехмерной структурой транзистора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 58-66.
10. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Манукян А.А. Новые проблемы логико-топологического синтеза заказных сложно-функциональных блоков и методы их решения // Информационные технологии. – 2014. – № 8. – С. 44-50.
11. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Манукян А.А. Методы проектирования заказных сложно-функциональных блоков в базисе элементов с регулярной топологической структурой в слоях поликремния и диффузии // VI Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2014”: Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. Ч. I. – С. 161-166.
12. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Шелоков А.Н. Методы логико-топологического синтеза библиотечных элементов для КМОП технологий с трехмерной структурой транзистора // Труды Международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям – 2014, “IS&IT’14”. – С. 98-102.
13. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Волобуев П.С. Актуальные проблемы автоматизации логико-топологического проектирования библиотечных элементов и блоков СБИС для нанометровых технологий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 4. – Вып. 50. Ч. 1. – С. 69-77.
14. Bryant R.E. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation // IEEE Trans. on Computers. – 1986. – P. 677-691.
15. Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Стемпковский А.Л. Методы логического и логико-временного анализа цифровых КМОП СБИС. – М.: Наука, 2007. – 220 с.
16. Стемпковский А.Л., Гаврилов С.В., Каграманян Э.Р. Методы логико-временного анализа заказных блоков СБИС // Известия ВУЗов. Электроника. – 2008. – № 5. – С. 41-50.

17. Гаврилов С.В., Глебов А.Л. BDD-based circuit level structural optimization for digital CMOS // 1-st Intern. Workshop "Multi-Architecture Low Power Design". – Moscow, 1999. – P. 45-49.
18. Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Щелоков А.Н. Логико-временной анализ нанометровых схем на основе интервального подхода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 85-91.
19. Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Рыжова Д.И. Интервальная модель задержек КМОП вентиля // IV Международная научно-практическая конференция «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени». – 2014. – № 4. Ч. 4. – С. 17-20.
20. Гаврилов С.В., Пирюткина Г.А., Щелоков А.Н. Статический временной анализ КМОП-схем с учетом дестабилизирующих факторов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 65-70.

## RETERENCES

1. Moore G.E. No Exponential is Forever: But “Forever” Can Be Delayed!, *Digest of Technical Papers of IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2003, pp. 20-23.
2. Natori K. Ballistic metal-oxide-semiconductor field effect transistor, *Journal of Applied Physics*, 1994, Vol. 76, No. 8, pp. 4879-4890.
3. Gavrilov S.V., Ivanova G.A. Analiz bystrodeystviya slozhnykh tsifrovyykh skhem s uchetom neopredelennosti tekhnologicheskikh i skhemnykh parametrov [Analysis of the performance of complex digital circuits with the uncertainty of the technological scheme and parameters], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan state Radiotechnical University], 2015, Issue 53, pp. 29-35.
4. Gavrilov S.V., Gudkova O.N. Logiko-vremennoy analiz nadezhnosti tsifrovyykh SBIS s uchetom effektivov degradatsii NBTI i HCI [Logical-time reliability analysis of digital VLSI taking into account the effects of NBTI and HCI degradation], *III Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem – 2008”*: sb. nauchn. tr. [III all-Russian scientific-technical conference “problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems – 2008”: collection of scientific works], under ed. A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2008, pp. 30-35.
5. FinFET: The Promises and the Challenges, *Synopsys, Inc.* Available at: <https://www.synopsys.com/COMPANY/PUBLICATIONS/SYNOPSYSINSIGHT/Pages/Art2-finfet-challenges-ip-IssQ3-12.aspx>.
6. 3D, 22 nm: New Technology Delivers An Unprecedented Combination of Performance and Power Efficiency, *Intel corporation*. Available at: <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/intel-22nmtechnology.html>.
7. Talalay M.S., Trushin K.V., Venger O.V. Logicheskiy sintez kombinatsionnykh skhem na osnove tranzistornyykh shablonov s regulyarnoy topologiyey [Logic synthesis for combinational circuits based on transistor patterns with regular topology], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2011, No. 4 (176), pp. 2-7.
8. Michael J.S. Smith Application-Specific Integrated Circuits, *VLSI Design Series*, 1997.
9. Gavrilov S.V., Ivanova G.A., Stempkovskiy A.L. Teoretiko-grafovaya model' slozhno-funktional'nykh blokov dlya KMOP tekhnologii s trekhmernoy strukturoy tranzistora [Theoretical-graph model of ip-blocks for cmos technology with 3d structure of the transistor], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 58-66.
10. Gavrilov S.V., Ivanova G.A., Manukyan A.A. Novye problemy logiko-topologicheskogo sinteza zakaznykh slozhno-funktional'nykh blokov i metody ikh resheniya [New problems of the logical-topological synthesis of custom-blocks and methods of their solution], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2014, No. 8, pp. 44-50.
11. Gavrilov S.V., Ivanova G.A., Manukyan A.A. Metody proektirovaniya zakaznykh slozhno-funktional'nykh blokov v bazise elementov s regulyarnoy topologicheskoy strukturoy v sloyakh polikremniya i diffuzii [Methods design of custom hard-function blocks in the basis elements with a regular topological structure in layers of polysilicon and diffusion], *VI Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem - 2014”*: Sbornik trudov [VI all-Russian scientific-technical conference “problems of development of perspective micro - and nanoelectronic systems - 2014”: the Collection of proceedings], under ed. A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2014. Part I, pp. 161-166.

12. Gavrilov S.V., Ivanova G.A., Shchelokov A.N. Metody logiko-topologicheskogo sinteza biblioteknykh elementov dlya KMOP tekhnologiy s trekhmernoy strukturoy tranzistora [Methods of logic-layout synthesis library cells for CMOS technology with three-dimensional transistor structures], *Trudy Mezhdunarodnogo kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam – 2014, "IS&IT'14"* [Proceedings of International Congress on intellectual systems and information technologies – 2014, "IS&IT'14"], pp. 98-102.
13. Gavrilov S.V., Ivanova G.A., Volobuev P.S. Aktual'nye problemy avtomatizatsii logiko-topologicheskogo proektirovaniya biblioteknykh elementov i blokov SBIS dlya nanometrovykh tekhnologiy [Actual problems of automation of logical and topological design of library items and blocks for nanometer VLSI technologies], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan state Radiotechnical University], 2014, No. 4, Issue 50. Part 1, pp. 69-77.
14. Bryant R.E. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation, *IEEE Trans. on Computers*, 1986, pp. 677-691.
15. Gavrilov S.V., Glebov A.L., Stempkovskiy A.L. Metody logicheskogo i logiko-vremennogo analiza tsifrovyykh KMOP SBIS [Methods of logical and logical-time analysis of digital CMOS VLSI]. Moscow: Nauka, 2007, 220 p.
16. Stempkovskiy A.L., Gavrilov S.V., Kagramanyan E.R. Metody logiko-vremennogo analiza zakaznykh blokov SBIS [Methods of logic-temporal analysis of a custom VLSI blocks], *Izvestiya VUZov. Elektronika* [Izvestiya vysshikh uchednykh zavedenii. Elektronika], 2008, No. 5, pp. 41-50.
17. Gavrilov S.V., Glebov A.L. BDD-based circuit level structural optimization for digital CMOS, *1-st Intern. Workshop "Multi-Architecture Low Power Design"*. Moscow, 1999, pp. 45-49.
18. Gavrilov S.V., Gudkova O.N., Shchelokov A.N. Logiko-vremennoy analiz nanometrovykh skhem na osnove interval'nogo podkhoda [Logic timing nanometer circuits analysis using interval approach], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 85-91.
19. Gavrilov S.V., Ivanova G.A., Ryzhova D.I. Interval'naya model' zaderzhek KMOP ventilya [Interval delay model of a CMOS gate], *IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Otechestvennaya nauka v epokhu izmeneniy: postulyaty proshlogo i teorii novogo vremeni»* [IV international scientific-practical conference "Domestic science in the era of changes: postulates of the past and the new theory of time"], 2014, No. 4. Part 4, pp. 17-20.
20. Gavrilov S.V., Piryutina G.A., Shchelokov A.N. Staticheskiy vremennoy analiz KMOP-skhem s uchetom destabiliziruyushchikh faktorov [Cmos circuit static timing analysis accounting for destabilizing factors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 65-70.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.Ф. Адамов.

**Гаврилов Сергей Витальевич** – Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН); e-mail: sergey\_g@ippm.ru; 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, 3; тел.: +74997299890; отдел автоматизации проектирования цифровых схем, зав. отделом; д.т.н.; профессор.

**Рыжова Дарья Игоревна** – e-mail: ryzhova\_d@ippm.ru; отдел автоматизации проектирования цифровых схем; м.н.с.

**Степковский Александр Леонидович** – e-mail: stal09@ippm.ru; директор; д.т.н.; профессор; академик РАН.

**Gavrilov Sergey Vitalievich** – Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science (IPPM RAS); e-mail: sergey\_g@ippm.ru; 3, Sovetskaya street, Zelenograd, Moscow, 124365, Russia; phone: +74997299890; the department of digital circuits design automation; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Ryzhova Daria Igorevna** – e-mail: ryzhova\_d@ippm.ru; the department of digital circuits design automation; junior research scientist.

**Stempkovskiy Aleksandr Leonidovich** – e-mail: stal09@ippm.ru; dr. of eng. sc.; professor; director; academician of RAS.

УДК 681.513.3

**Ю.Р. Кузин, А.В. Калинин, Д.С. Гримак****МЕТОД КОРРЕКЦИИ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТОКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В МЕСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

*Предлагается новый метод параллельной коррекции следящего привода на двигателе постоянного тока с использованием трансформатора тока в местной обратной связи. Трансформатор используется в дифференцирующем режиме. В отличие от классического режима трансформатор в этом режиме способен работать в области низких рабочих частот привода, сохраняя небольшие габариты. При этом метод обладает преимуществами по сравнению с другими видами организации обратной связи по току. В отличие от резистивного шунта трансформатор обеспечивает гальваническую изоляцию системы управления от силовой части. В отличие от датчика Холла трансформатор обладает радиационной стойкостью и может применяться на космических аппаратах. Особенно полезен предлагаемый метод для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры военного назначения в виду существующих ограничений на применение электронной компонентной базы. Для расчета корректирующей цепи используется традиционный частотный подход. Корректирующая цепь в местной обратной связи представляет собой последовательно включенные трансформатор и две RC-цепи, образующие фильтр нижних частот с двумя действительными полюсами. Этот фильтр играет двойную роль: корректирует частотную характеристику следящей системы, чтобы обеспечить определенное техническим заданием качество, и отделяет полезный сигнал на выходе трансформатора от высокочастотного шума широтно-импульсного усилителя мощности. Особенность предлагаемой схемы в том, что отношение сигнал/шум на выходе трансформатора может быть меньше единицы, но благодаря большому частотному разнесению сигнала и шума, собственной избирательной способности цепей коррекции оказывается достаточно для выделения сигнала, пригодного для замыкания местной обратной связи. Местная обратная связь в целом представляет собой полосовой фильтр с максимальным коэффициентом усиления в рабочей полосе частот привода. Рассматриваются вопросы проектирования трансформатора для организации обратной связи по току, выбора компонентов и расчета его параметров. На основе предлагаемой методики был изготовлен трансформатор и проведены эксперименты, подтверждающие адекватность математической модели системы.*

*Следящий привод; трансформатор тока; параллельная коррекция; система автоматического управления.*

**Yu.R. Kuzin, A.V. Kalinin, D.S. Grimak****COMPENSATION OF THE SERVOMECHANISM USING MINOR FEEDBACK  
LOOP WITH CURRENT TRANSFORMER**

*The servo system synthesis approach is proposed to use the current transformer in the minor feedback loop. The transformer is used as highpass filter of motor rotor current. Its cutoff frequency is out of the servo system bandwidth, so transformer behaves like differentiator. This way is used to avoid transformer low frequency challenge. So the small transformer can operate at low frequencies. This approach has advantages over others. As opposed to current shunt a transformer provides electrical isolation of control and power nets. As opposed to Hall sensor a transformer has a high ionization resistance, so it can be used in the space. Moreover, transformer is a simple winding product: it can be made as a part of motor windings, so special servo drive motor can be developed. Output signal of the transformer is rotor current derivative mixed with pulse modulation noise. Signal gets the adder through compensator nets. The synthesis of compensator is performed in frequency domain by means of Bode diagram. Compensator is 2-poles lowpass filter to achieve system required quality. Physically the lowpass filter is two RC nets connected serially. Due to the noise frequency is well above the frequency of signal, that RC-filter is sufficient to get current derivative to be clear enough for compensation. Minor feedback loop as a whole is*

*bandpass filter, which has passthrough range in the servo system bandwidth. The theory has been verified by means of experiments. Mathematical model has been proved experimentally. Technique to calculate the parameters of current transformer in minor feedback path is discussed.*

*Servomechanism; current transformer; minor feedback loop; feedback control system.*

**Введение.** При проектировании высокоточного быстродействующего следящего привода приходится увеличивать коэффициент усиления по рассогласованию, чтобы выполнить требования технического задания. При этом возникает задача коррекции следящего контура с целью обеспечения запаса устойчивости и нужного качества переходного процесса. На этом этапе разработчик должен принять решение о способе реализации корректирующего устройства. Параллельная коррекция по сравнению с последовательной требует более сложных и дорогих технических решений. Однако она обладает рядом преимуществ, главное из которых - нечувствительность системы к параметрам неизменяемой части (объекта управления). Это общее свойство систем с глубокой обратной связью. Нередко параллельная коррекция - единственный способ добиться желаемого качества работы системы. В любом случае целью коррекции является изменение амплитудной частотной характеристики (АЧХ) системы с оборванной главной обратной связью в области частоты единичного усиления, именуемой частотой среза следящей системы, где итоговая характеристика должна иметь спад со скоростью 20 дБ/дек. Увеличение коэффициента усиления разомкнутого контура (добротности) приводит к усилению шумов и наводок в системе, в том числе шума дискретизации сигнала по уровню при цифровом способе реализации системы управления приводом. По этой причине необходимо сделать полосу пропускания замкнутого контура по возможности более узкой, но не уже, чем это требуется для отслеживания входного воздействия в рабочей полосе частот. В идеале АЧХ разомкнутого контура должна иметь прямоугольную форму, но это невозможно на практике, так как такая система была бы неустойчива. Если верхняя граница рабочей полосы частот близка к частоте первого излома диаграммы Боде неизменяемой части, то алгоритм управления при параллельной коррекции выглядит проще, чем при последовательной. Это еще одно преимущество параллельной коррекции, которое играет большую роль как при аналоговой, так и при цифровой реализации системы управления. При последовательной коррекции сложный алгоритм управления потребует не только большего объема вычислений, но и более высокой точности расчетов, характерной для систем высокого порядка. Особые трудности применения последовательной коррекции могут быть вызваны необходимостью компенсировать отрицательные изломы АЧХ неизменяемой части, что приводит к многократному дифференцированию сигнала и большим ошибкам в условиях шума.

Реализация параллельной коррекции предполагает организацию местной обратной связи, когда управляющее воздействие формируется с учетом измерения какой-либо физической величины. Обычно измеряется скорость движения или ток двигателя. В первом случае систему нужно дополнить датчиком скорости. Для коррекции скоростной сигнал дифференцируется, чтобы получить вторую производную от положения. Этот способ параллельной коррекции широко распространен, несмотря на конструктивное усложнение привода, благодаря простоте алгоритма и независимости от типа двигателя. Измерение тока конструктивно проще, а в системах без внешнего момента сил позволяет добиться высокого качества работы, применяя очень простые алгоритмы. Типовой пример чисто инерционной нагрузки - наведение средств видеонаблюдения. Однако, прямая обратная связь по току ограничивает способность привода сопротивляться статической внешней нагрузке, так как снижает коэффициент усиления системы по отношению к возмущающему воздействию. В такой ситуации для местной обратной связи применяется производная от тока.

**Способы организации обратной связи по току.** Рассмотрим виды датчиков тока:

- ◆ резистивный шунт;
- ◆ датчик на эффекте Холла;
- ◆ трансформатор тока.

Резистивный шунт обладает существенным активным сопротивлением, чтобы обеспечить уровень сигнала достаточно большой для последующей обработки. В силовом приводе шунт должен иметь большие размеры, чтобы рассеивать тепло. Зарубежная промышленность выпускает большое количество типов токовых шунтов, обладающих специальными свойствами, такими как высокая стабильность характеристик, низкий уровень собственного шума и стойкость по отношению к импульсным токам. Среди отечественных предприятий можно отметить ОАО "НИИ электронно-механических приборов" г. Пенза, предлагающее мощные шунты Р2-103, и ОАО "НПО "ЭРКОН" г. Нижний Новгород, которое производит безындуктивные фольговые чип-резисторы Р2-105 международных типоразмеров мощностью до 2 Ватт и номиналом от 1 мОм. Важно, что указанные изделия отечественных производителей включены в «Перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». Фактически, разработчик радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) военного назначения при подборе шунта ограничен в выборе между проволокой из манганина и шунтами Р2-103, Р2-105. Недостатком схем, использующих шунт для измерения тока, является отсутствие гальванической изоляции между силовой и измерительной частью, либо очень сложная ее организация.

Датчик Холла в качестве инструмента для измерения тока, возможно, самое подходящее решение в большинстве случаев, так как он достаточно мал даже при измерении тока в сотни ампер благодаря небольшому активному сопротивлению, которое теоретически может быть сколь угодно мало из-за иного физического принципа измерения тока по сравнению с шунтом. Кроме того, датчик Холла обеспечивает гальваническую изоляцию силовой и измерительной цепей. За рубежом выпускаются интегральные микросхемы, представляющие собой законченное полнофункциональное решение по измерению тока, основанное на этом эффекте. Главным недостатком таких устройств является их сложность, что служит причиной отсутствия подобных микросхем в Перечне ЭКБ. Самостоятельное изготовление датчиков Холла на неспециализированных предприятиях также не представляется возможным по той же причине. Поэтому разработчику РЭА военного назначения такие устройства недоступны.

Трансформатор тока обеспечивает гальваническую изоляцию, прост в изготовлении, а его габариты определяются желаемыми частотными свойствами. Основным ограничением на его использование в качестве измерительного устройства служит неспособность работать на низких частотах.

В табл. 1 сравниваются перечисленные датчики тока.

Таблица 1

Сравнительные характеристики датчиков тока

	Токовый шунт	Датчик Холла	Трансформатор тока
Гальваническая изоляция	нет	да	да
Доступность датчика	да	нет	да
Работа по постоянному сигналу	да	да	нет

Наличие нижней границы полосы пропускания у трансформатора кажется непреодолимым препятствием для его применения в следящем приводе, который напротив имеет рабочую полосу в области низких частот: от нуля, то есть сигналы содержат постоянную составляющую, и до десятков герц. И, если говорить об измерении тока с целью выполнить схему токоограничения или защиты от короткого замыкания, то так оно и есть. Однако, частотная коррекция привода - совсем другое дело. Данная статья посвящена тому, как обойти указанное ограничение трансформатора.

**Математическая модель трансформатора тока.** Рассмотрим принцип работы трансформатора, используя, принятый в теории автоматического управления, структурный подход. На рис. 1 приведена эквивалентная схема трансформатора и обозначения физических величин.

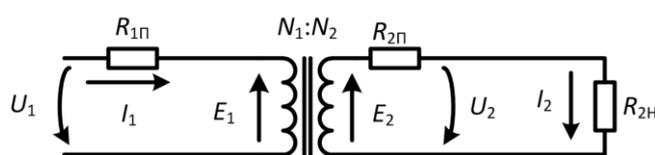


Рис. 1. Эквивалентная схема трансформатора

Приняты следующие обозначения:

$N_1, N_2$  – количество витков первичной и вторичной обмоток;

$U_1, U_2$  – входное и выходное напряжения;

$i_1, i_2$  – токи первичной и вторичной обмоток;

$R_{1П}, R_{2П}$  – активные сопротивления обмоток;

$R_{2Н}$  – активное сопротивление нагрузки;

$E_1, E_2$  – ЭДС, наведенная в обмотках.

На рис. 2 показана структурная схема, поясняющая физические принципы работы трансформатора.

На схеме использованы следующие обозначения:

$p$  – оператор дифференцирования;

$l$  – эффективная длина магнитного пути замкнутого сердечника;

$S$  – эффективное сечение сердечника;

МДС<sub>1</sub>, МДС<sub>2</sub> – магнитодвижущая сила обмоток;

$H$  – напряженность магнитного поля;

$B$  – магнитная индукция;

$\Phi$  – магнитный поток;

$\Psi_1, \Psi_2$  – потокоцепления обмоток

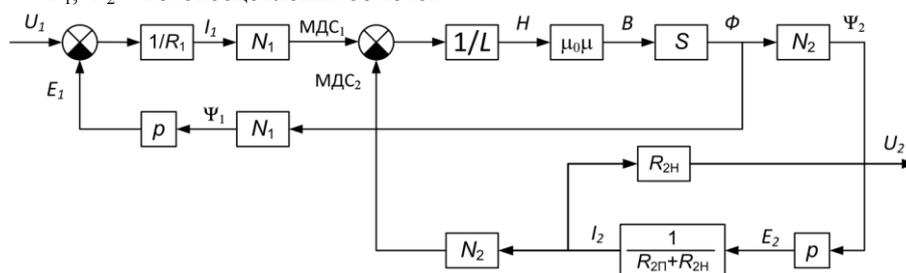


Рис. 2. Структурная схема математической модели трансформатора

Приведем структуру, изображенную на рис. 2, к виду более удобному для анализа трансформатора в токовом режиме (рис. 3).

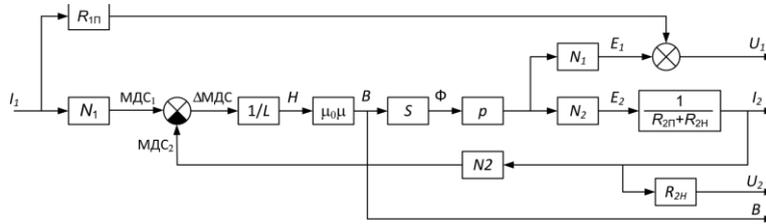


Рис. 3. Структурная схема трансформатора тока

$U_1$  – входное напряжение, которое будем рассматривать как падение напряжения на первичной (силовой) обмотке, так как входным сигналом является ток  $i_1$ ;

$U_2$  – выходное напряжение трансформатора, измеряемое на низкоомном резисторе нагрузки  $R_{2Н}$  вторичной (измерительной) обмотки;

$B$  – индукция магнитного поля в сердечнике.

Допустим, что в качестве исполнительного элемента в приводе использован двигатель постоянного тока (ДПТ). Силовую обмотку трансформатора можно включить непосредственно в цепь якоря двигателя. Благодаря гальванической изоляции сигнал с измерительной обмотки можно подать в любую часть схемы управления без дополнительных издержек, поэтому сигнал поступает сразу в систему управления через цепи коррекции как показано на рисунке 4.

Сигнал на выходе токового трансформатора, который поступает на цепи коррекции, можно представить так:

$$U_2 = W_{ТТ}(p)i_1, \tag{1}$$

где  $W_{ТТ}(p)$  - передаточная функция трансформатора тока.

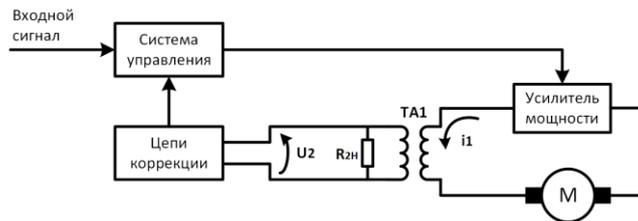


Рис. 4. Структурная схема следящего привода с местной обратной связью на трансформаторе тока (главная обратная связь не показана)

Из структуры на рис. 3 можно определить, что

$$W_{ТТ}(p) = \frac{R_{ТТ}p}{p+\omega_0}, \tag{2}$$

где  $R_{ТТ}$  – коэффициент усиления на высоких частотах, имеющий размерность сопротивления;  $\omega_0$  – частота среза трансформатора.

Из (2) следует, что трансформатор тока ведет себя как фильтр высоких частот первого порядка, дифференцируя сигнал в диапазоне низких частот (при  $\omega \ll \omega_0$ ). На рисунке 5 приведена типовая частотная характеристика трансформатора.

Параметры в выражении (2) определяются так:

$$R_{ТТ} = R_{2Н} \frac{N_1}{N_2}. \tag{3}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{T} = \frac{R_2}{A_l N_2^2}, \tag{4}$$

где  $T$  – постоянная времени трансформатора тока;  $R_2 = R_{2Н} + R_{2П}$  – суммарное сопротивление во вторичной цепи;  $A_l$  – начальная индуктивность:

$$A_l = \frac{\mu_0 \mu S}{l}. \tag{5}$$

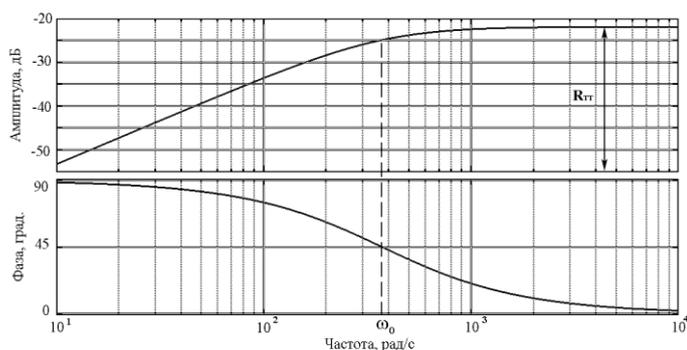


Рис. 5. Частотная характеристика трансформатора

Пусть  $L_1$  и  $L_2$  - индуктивности первичной и вторичной обмоток:

$$L_1 = A_l N_1^2. \quad (6)$$

$$L_2 = A_l N_2^2 \quad (7)$$

заимная индуктивность обмоток:

$$L_{12} = \sqrt{L_1 L_2} = A_l N_1 N_2. \quad (8)$$

Обозначим  $\chi$  полезную долю выходного сигнала, которая представляет собой отношение сопротивления нагрузки к суммарному сопротивлению выходной цепи:

$$\chi = \frac{R_{2н}}{R_2}. \quad (9)$$

Тогда, учитывая что

$$T = \frac{L_2}{R_2}. \quad (10)$$

$$\frac{R_{ГГ}}{\omega_0} = \chi L_{12} \quad (11)$$

передаточную функцию (2) можно переписать так:

$$W_{ГГ}(p) = \frac{\chi L_{12} p}{Tp + 1}. \quad (12)$$

Таким образом, из (2) и (12) следует, что на высоких частотах (при  $\omega \gg \omega_0$ ) передаточную функцию можно рассматривать как безынерционное звено:

$$W_{ГГ}(p) \approx R_{ГГ}, \quad (13)$$

а на низких частотах (при  $\omega \ll \omega_0$ ) как дифференциатор:

$$W_{ГГ}(p) \approx \chi L_{12} p. \quad (14)$$

**Коррекция на основе трансформатора тока.** Используя трансформатор тока в качестве дифференцирующего устройства, можно организовать обратную связь по производной тока двигателя. Для этого необходимо, чтобы рабочая частота следящей системы  $\omega_p$  была меньше частоты среза трансформатора ( $\omega_p \ll \omega_0$ ). Полученная таким образом местная обратная связь работает во всей полосе пропускания системы, начиная с постоянного сигнала. Дополнительное дифференцирование тока не только не мешает коррекции частотной характеристики, но, напротив, дает дополнительные преимущества, так как увеличивает жесткость системы по возмущающему воздействию. Постоянный момент на выходном валу привода не влияет на сигнал обратной связи и не ведет к снижению величины управляющего сигнала, что следует с позиций метода рассматривать как норму: производная от постоянной величины равна нулю. Заметим, что для выполнения схем токоограничения и защиты от короткого замыкания этот метод не подходит.

Однако, эти две задачи обычно решаются схемотехнически в силовой части, не требуя гальванической изоляции. В качестве критерия срабатывания защиты может использоваться, например, выход силовых транзисторов из состояния насыщения. Заменяя ток его производной, получим более крутой срез частотной характеристики разомкнутой системы сразу после рабочей частоты. Вместо спада 40 дБ/дек будет наклон минус 60 дБ/дек. На рисунке 6 показан пример частотного синтеза следящей системы с использованием трансформатора тока.

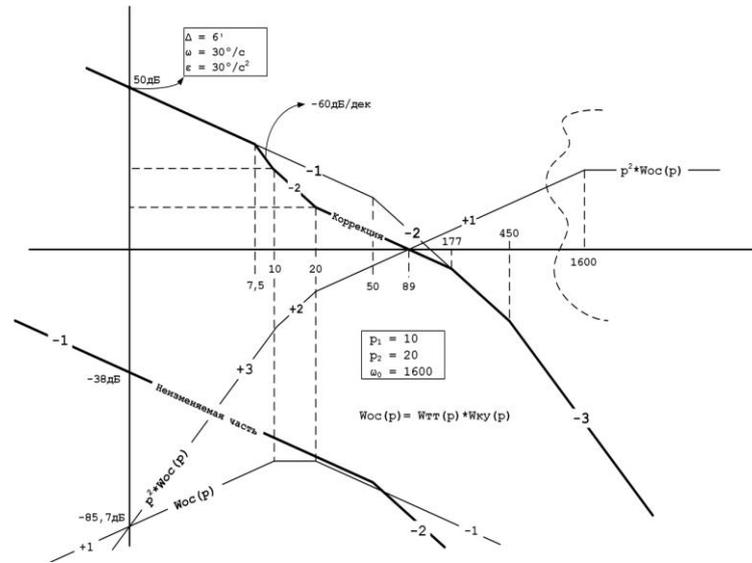


Рис. 6. Пример частотного синтеза следящей системы с трансформатором тока

Более быстрый спад желаемой характеристики приводит к необходимости усложнения корректирующих цепей (рис. 4). Их передаточная функция увеличивается на порядок по сравнению с прямой обратной связью по току из-за дополнительного полюса<sub>2</sub>:

$$W_{КУ}(p) = \frac{K_{КУ}}{(p-p_1)(p-p_2)}. \quad (15)$$

Без второго полюса характеристика пересекла бы линию единичного усиления под наклоном минус 40 дБ/дек и замкнутая система была бы неустойчива. Оба полюса действительные, поэтому передаточная функция  $W_{КУ}$  представляет собой апериодическое звено второго порядка и может быть реализована с помощью двух RC-цепей. Теоретически один из полюсов можно было бы получить как частоту среза трансформатора  $\omega_0$ , но практически это потребует изготовления трансформатора чрезмерно больших размеров. На рисунке 6 показана система, в которой оба полюса  $p_1 = 10$  и  $p_2 = 20$  реализуются с помощью корректирующих цепей, а собственная частота среза трансформатора  $\omega_0 = 1600$  находится далеко за значащими частотами системы и не оказывает влияния на ее функционирование.

Полная передаточная функция цепей обратной связи по току представляет собой произведение передаточных функций трансформатора тока и цепей коррекции:

$$W_{OC}(p) = W_{тт}(p)W_{КУ}(p).$$

Корректирующее устройство  $W_{КУ}$  может быть реализовано как цифровым, так и аналоговым способом. В первом случае можно избежать RC-цепей с большими постоянными времени, однако перед АЦП потребуется реализовать предва-

рительный фильтр, который эффективно подавит шумы на частотах выше половины частоты дискретизации сигнала. Если предварительный фильтр выбрать с небольшими постоянными времени, это приведет к большой полосе пропускания и потребует увеличения порядка фильтра, чтобы добиться равноценного подавления шума на той же частоте. Эксперименты показали, что само корректирующее устройство, реализованное в аналоговом виде, служит эффективным фильтром, подавляющим шумы перед дискретизацией. Это связано с тем, что АЧХ цепей обратной связи имеет вид полосового фильтра (рисунок 6) с максимумом в области средних частот, то есть в зоне коррекции, и, несмотря на малую скорость спада характеристики, подавление шума эффективно благодаря раннему началу спада. При этом конденсаторы корректирующих цепей имеют номинал в несколько микрофарад, что не создает больших проблем по реализации. Таким образом, при цифровом способе реализации системы управления коррекцию также выгоднее делать в аналоговом виде: проще выполнить цифро-аналоговое преобразование сигнала коррекции, чем непосредственно трансформатора тока.

**Расчет корректирующего трансформатора тока.** Выясним, на что следует обратить внимание при проектировании трансформатора тока с целью коррекции следящего привода.

В отличие от стандартного режима работы трансформатора, когда магнитный поток в сердечнике мал, в дифференцирующем режиме величину магнитной индукции  $B$  нужно принимать в расчет. При работе привода на номинальную нагрузку сердечник не должен насыщаться, то есть требуется выполнение условия:

$$B < B_{\text{нас}}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что выбирать сердечник нужно из материала с большой предельной величиной магнитной индукции. Желательно также, чтобы проницаемость  $\mu$  слабо зависела от напряженности магнитного поля. Для таких целей подойдет феррит силовой марки, например 2500НМС1 ( $B_{\text{нас}} = 0,25\text{Тл}$ ), в виде сердечника с зазором, или мо-пермаллой, например П60 ( $B_{\text{нас}} = 0,5\text{Тл}$ ), в кольцевом сердечнике с распределенным зазором. Принципиально важно, что сердечник должен запасать энергию, и более правильно было бы называть такой трансформатор дросселем с двумя обмотками.

Из структуры на рис. 3 с учетом (4) и (5) можно получить зависимость магнитной индукции от тока в первичной цепи:

$$B = \frac{A_l N_1}{S} \frac{1}{T\rho + 1} i_1.$$

Рабочие частоты следящего привода лежат существенно ниже  $\omega_0 = 1/T$ , поэтому можно записать:

$$B \approx \frac{A_l N_1}{S} i_1. \quad (17)$$

Из (16) и (17) получим ограничение на максимальное количество витков первичной цепи:

$$N_1 < \frac{B_{\text{нас}} S}{i_{1\text{max}} A_l}, \quad (18)$$

где  $i_{1\text{max}}$  - максимально возможное значение тока якоря в следящем режиме, включая ток нагрузки и динамический ток;  $B_{\text{нас}}$ ,  $S$ , и  $A_l$  - параметры сердечника трансформатора.

Коэффициент начальной индуктивности  $A_l$  слабо зависит от габаритов сердечника, но возрастает с увеличением магнитной проницаемости материала  $\mu$ . Однако, увеличение  $A_l$  требует снижения количества витков первичной цепи  $N_1$  ровно в такое же количество раз, так как произведение  $A_l * N_1$  ограничено условием насыщения (18). Сравнивая (8) с условием насыщения (18), и принимая во внимание,

что коэффициент передачи трансформатора в дифференцирующем режиме равен  $\chi L_{12}$ , можно сделать вывод о том, что для увеличения размаха полезного сигнала желательно обеспечить:

$$A_l N_1 = \frac{B_{нас} S}{i_{1max}}. \quad (19)$$

Тогда коэффициент передачи трансформатора в дифференцирующем режиме:

$$\chi L_{12} = \frac{R_{2н}}{R_{2н} + R_{2п}} \frac{B_{нас} S N_2}{i_{1max}}. \quad (20)$$

При этом произведение  $A_l * N_1$  лучше увеличивать за счет  $A_l$ , уменьшая  $N_1$ , чтобы минимизировать коэффициент усиления высокочастотных шумов  $R_{тг}$ . Выражение (20) показывает факторы, способствующие увеличению полезного сигнала на выходе. Коэффициент дифференциатора пропорционален количеству витков во вторичной цепи  $N_2$ , которое ограничено только габаритами сердечника и толщиной провода. Однако, чем больше витков (и чем тоньше провод), тем выше сопротивление провода  $R_{2п}$ , что, возможно, потребует увеличения  $R_{2н}$ . В случае когда  $R_{2п} \gg R_{2н}$ , коэффициент передачи практически не зависит от  $N_2$  вследствие того, что сопротивление провода  $R_{2п}$  пропорционально  $N_2$ :

$$R_{2п} = \rho_{2п} l_{витка} N_2, \quad (21)$$

где  $\rho_{2п}$  – удельное сопротивление провода вторичной обмотки;  $l_{витка}$  – средняя длина одного витка провода.

Также коэффициент возрастает с увеличением максимально допустимого потока сердечника  $B_{нас} * S$ , а значит зависит от материала и опять же габаритов. Максимальный поток кольца из мо-пермаллоя приблизительно в полтора раза больше, чем у Ш-образного сердечника того же габарита на основе феррита 2500НМС1. При этом преимущество достигается за счет двойного преобладания по  $B_{нас}$ . Сечение же магнитопровода у мо-пермаллоя даже меньше, что благотворно отражается на итоговой длине провода при увеличении числа витков. Число витков  $N_2$  на кольце выходит более, чем в два раза больше, чем на стержне трансформатора на Ш-образных сердечниках, из-за большей его длины. С другой стороны применение феррита может быть оправдано на П-образных сердечниках, благодаря, во-первых, возможности устанавливать две последовательно соединенные катушки на оба стержня, а, во-вторых, увеличению длины стержней без увеличения длины яра. Применение ферритовых сердечников с зазором позволяет снизить количество витков первичной цепи за счет увеличения  $A_l$ , чтобы снизить уровень высокочастотного шума, не меняя амплитуду рабочего сигнала. Дополнительный плюс от использования П-образных сердечников с зазором в более технологичной намотке по сравнению с кольцом.

Еще одно требование появляется из желания сделать падение напряжения на первичной цепи трансформатора тока незначительным, чтобы снизить влияние на цепь управления двигателем. Передаточную функцию напряжения  $U_1$  от тока  $i_1$  в первичной цепи получим из структуры на рисунке 3 с учетом (5), (6), (7) и (10):

$$W_{ПАД}(p) = \frac{L_1 p}{N_1 T p + 1} + R_{1п} \quad (22)$$

или через частоту излома

$$W_{ПАД}(p) = R_2 \left( \frac{N_1}{N_2^2} \right) \frac{p}{p + \frac{\omega_0}{N_1}} + R_{1п}. \quad (22^*)$$

В идеале трансформатор тока должен работать в короткозамкнутом режиме, когда суммарное сопротивление во вторичной цепи  $R_2 = 0$ . Тогда падение напряжения на первичной обмотке в силовой цепи будет определяться только ее активным сопротивлением  $R_{1п}$ , которое мало. В действительности трансформатор работает, по крайней мере, на собственное сопротивление вторичной обмотки  $R_{2п}$ . Кроме того, желательно, чтобы ток вторичной цепи, протекающий через резистор  $R_{2н}$  при рабочей нагрузке двигателя, создавал падение напряжения достаточно большое для последующих преобразований:

$$U_{2p} > U_{2min} \cdot \quad (23)$$

Условие (23) ограничивает номинал  $R_{2H}$  снизу и увеличивает падение напряжения в силовой цепи трансформатора. Однако, как будет показано ниже, размах полезного сигнала  $U_{2p}$  возрастает с увеличением  $R_{2H}$  до некоторых пор, затем этот рост замедляется, а отношение сигнал/шум начинает существенно ухудшаться. Практически, это ограничивает номинал  $R_{2H}$  сверху до того, как нагрузка вторичной цепи будет преобладать над  $R_{1П}$ . Лучше выбирать  $R_{2H}$  по меньшей мере в несколько раз больше  $R_{2П}$ , чтобы ослабить влияние технологической и температурной нестабильности собственного сопротивления провода.

Кроме того, желательно ограничить мощность, рассеиваемую на резисторе  $R_{2H}$ , чтобы уменьшить его габариты:

$$P_2 < P_{2max} \cdot \quad (24)$$

Условие (24) необходимо проверить после выбора  $R_{2H}$ .

Рассмотрим первую (динамическую) составляющую в выражении (22). Частота среза АЧХ зависимости  $U_1(i_1)$  меньше в  $N_1$  раз по сравнению с выходной характеристикой трансформатора  $U_2(i_1)$ , как это видно из (12). На рис. 7 показаны АЧХ обеих зависимостей для сравнения.

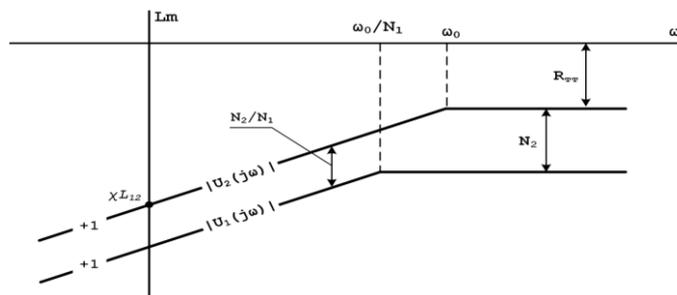


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики входного и выходного напряжений трансформатора тока в зависимости от входного тока

В области низких частот ( $\omega \ll \omega_0/N_1$ ) выражение (22) можно представить проще:

$$W_{\text{ПАД}}(p) \approx L_1 p + R_{1П} = L_{12} \frac{N_1}{N_2} p + R_{1П}.$$

Таким образом, для низких частот, в т.ч. для типового гармонического закона движения, динамическая составляющая падения напряжения на первичной обмотке трансформатора будет меньше уровня полезного сигнала на выходе приблизительно в передаточное отношение раз (полагаем  $\chi \approx 1$ ). На практике, если  $N_1$  достаточно велика, частота среза  $|U_1(j\omega)|$  окажется внутри диапазона рабочих частот следящей системы, что способствует ограничению влияния трансформатора на силовую цепь. Благодаря более раннему срезу, величина динамической составляющей высокочастотного шума, наведенного импульсным усилителем мощности, будет на первичной обмотке меньше, чем на вторичной в  $N_2$  раз. Это следует из рассмотрения (22) в области высоких частот с учетом (3), (6), (7), (9), (10):

$$W_{\text{ПАД}}(p) \approx \frac{L_1}{N_1 T} + R_{1П} = \frac{R_{ГТ}}{\chi N_2} + R_{1П}$$

и сравнения результата с (13) (полагаем  $\chi \approx 1$ ).

Так как  $N_2$  велико, то динамической составляющей можно пренебречь в расчетах и считать падение напряжения исключительно исходя из активного сопротивления обмотки  $R_{1П}$ :

$$U_1 \approx R_{1П} i_1 \cdot \quad (25)$$

Оценить величину полезного сигнала на рабочей частоте можно с помощью выражения (1), откуда с учетом (14):

$$U_{2p} \approx \chi L_{12} \omega_p I_{1p} \cdot \quad (26)$$

где  $\omega_p$  и  $I_{1p}$  - круговая частота и амплитуда тока типового гармонического закона нагружения привода. Используя выражение (20), можно переписать (26):

$$U_{2p} \approx \frac{R_{2H}}{R_{2H} + R_{2П}} \frac{I_{1p}}{i_{1max}} \omega_p B_{нас} S N_2 \cdot \quad (26^*)$$

Аналогично из (1) и (13) следует, что величину шума, наведенного на выходе в области высоких частот импульсным усилителем мощности, можно оценить с помощью выражения:

$$U_{2шум} \approx R_{ТТ} I_{1шум} \cdot \quad (27)$$

Из рис. 7 видно, что коэффициент передачи трансформатора на высоких частотах, где присутствуют пульсации тока в цепи якоря, вызванные импульсной модуляцией управляющего сигнала, выше, чем в области дифференцирования. Уменьшение  $R_{ТТ}$  пропорционально снизит  $L_{12}$ , так что отношение сигнал/шум останется неизменным. На практике отношение сигнал/шум очень мало: меньше единицы. Например, пульсации тока, вызванные широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), имеют треугольный вид со скоростью нарастания сигнала, зависящей исключительно от свойств неизменяемой части: напряжения питания и индуктивности обмоток двигателя. При частоте ШИМ 20 кГц, напряжении питания ДПТ 80В и индуктивности якоря 0,3 мГн пульсации тока в якорной цепи  $I_{1шум}$  будут иметь амплитуду до 3 А. При соотношении витков - 10 и сопротивлении  $R_{2H} = 5$  Ом, наведенные ШИМом, пульсации составят 1,5 В, что может в 10 раз превышать амплитуду полезного сигнала! Главным поводом для оптимизма служит большой разнос по частоте между полезным сигналом и шумом (приблизительно в 1000 раз), тем не менее желательно, чтобы частота излома АЧХ трансформатора  $\omega_0$  была как можно меньше. Тогда, как следует из (11), отношение сигнал/шум возрастет в той же пропорции. Подводя итог вышесказанному, и с учетом (11) и (4) можно записать выражение для отношения сигнал шум:

$$SNR = \frac{\chi L_{12} \omega_p I_{1p}}{R_{ТТ} I_{1шум}} = \frac{A_t N_2^2}{R_{2H} + R_{2П}} * \frac{\omega_p I_{1p}}{I_{1шум}} \cdot \quad (28)$$

Если сопротивление провода вторичной обмотки  $R_{2П} \ll R_{2H}$ , то отношение сигнал/шум возрастает пропорционально квадрату числа витков вторичной обмотки  $N_2$  и обратно пропорционально номиналу резистора  $R_{2H}$ . Однако, при существенном увеличении числа витков ( $R_{2П} \gg R_{2H}$ ), отношение сигнал/шум не зависит от изменения  $R_{2H}$ , а с увеличением  $N_2$  растет прямо пропорционально, что следует из (21). Из (26\*) видно, что увеличение  $N_2$  оказывает положительный эффект также и на полезный сигнал. На рис. 8 в логарифмическом масштабе показано влияние отношения  $R_{2H}/R_{2П}$  на отношение сигнал/шум в сравнении с полезным сигналом.

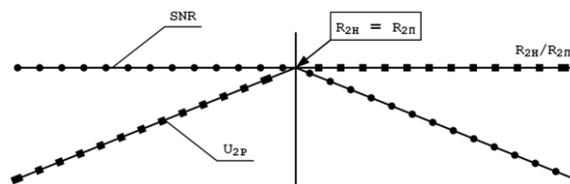


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/шум (SNR) и амплитуды рабочего сигнала ( $U_{2p}$ ) от отношения сопротивления нагрузки  $R_{2H}$  к собственному сопротивлению провода вторичной обмотки  $R_{2П}$  (логарифмический масштаб)

При  $R_{2H} = R_{2П}$  достигается компромисс, однако из технологических соображений лучше принять  $R_{2H} > 3R_{2П}$ .

В соотношении (24)  $P_2$  - это суммарная мощность, рассеиваемая на  $R_{2H}$ , включая как полезный сигнал, так и шум. Причем шум, как отмечалось, может вносить больший вклад в разогрев резистора.

Для снижения рассеиваемой мощности при пуске двигателя можно применить ограничитель напряжения типа 2С401БС2, поставленный параллельно резистору. При этом нужно обеспечить, чтобы в следящем режиме суммарное напряжение сигнал + шум не выходило за пределы ограничителя  $U_{огр}$ . В противном случае будет утеряна полезная информация. В условиях преобладания шума на  $R_{ТТ}$  накладывается ограничение, которое следует из (27):

$$R_{ТТ} < \frac{U_{огр}}{I_{1шум}}. \quad (29)$$

Аналогично из (26) следует, что при высоком уровне полезного сигнала необходимо гарантировать

$$\chi L_{12} < \frac{U_{огр}}{\omega_p I_{1р}}. \quad (30)$$

Требование (30) начинает преобладать над (29) с ростом рабочей частоты, так как производная тока пропорциональна его частоте. Подставляя в условия (29), (30) выражения (3),(20) и учитывая что  $\chi < 1$  и  $I_{1р} < i_{1max}$ , получим:

$$R_{2H} \frac{N_1}{N_2} < \frac{U_{огр}}{I_{1шум}}. \quad (31)$$

$$N_2 < \frac{U_{огр}}{\omega_p B_{нас} S}. \quad (32)$$

Неравенства (31), (32) накладывают ограничения на выбор количества витков обмоток и номинал резистора  $R_{2H}$ .

**Экспериментальная проверка математической модели.** В соответствии с изложенной методикой был изготовлен трансформатор на кольцевом сердечнике из мо-пермаллоя марки П60. Сердечник состоял из двух сложенных колец полукруглого сечения КП 44 x 28 x 10,3 производства ОАО «Ферроприбор» г. Санкт-Петербург. Сначала была уложена первичная обмотка, которая выполнялась проводом ПЭТВ-2 диаметром 0,5 мм в пучке из 10 штук. Затем - вторичная тем же, но уже одиночным проводом. Первичная обмотка содержала 39 витков, вторичная - 250. В качестве нагрузки использовался резистор номиналом 5,1 Ома мощностью 2 Вт. Расчетное значение сопротивления вторичной обмотки - 1,28 Ом, измеренное - 1,25 Ом.

На рис. 9 приведена функциональная схема экспериментальной установки для проверки математической модели корректирующего трансформатора.

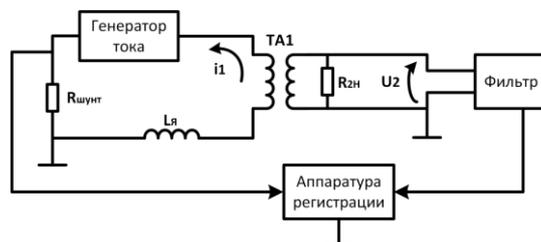


Рис. 9. Функциональная схема экспериментальной установки

Генератор тока формирует импульсным способом синусоидальный ток  $i_1$  с заданными амплитудой и частотой. Ток протекает через первичную обмотку трансформатора, индуктивность  $L_{я} = 0,3$  мГ и шунт сопротивлением 0,15 Ом. Ток

вторичной обмотки создает на резисторе нагрузки  $R_{2Н}$  падение напряжение  $U_2$ , которое поступает на предварительный фильтр, ослабляющий гармоники выше половины частоты дискретизации регистрирующей аппаратуры. Одновременно происходит запись уровня напряжения на измерительном шунте, которое пропорционально току первичной обмотки.

Трансформатор спроектирован для применения в цепях коррекции привода на базе ДПТ номинального тока 17,5 А. Верхняя граница рабочих частот, где требуется обеспечить заданную динамическую ошибку - 1,5 Гц. Зона коррекции лежит выше этой частоты. Наихудшие условия работы корректирующих цепей соответствуют частоте 1,5 Гц. С увеличением частоты отношение сигнал/шум на выходе трансформатора растет. Ниже приводится результат теста для тока первичной цепи с амплитудой 30 А и частотой 1,5 Гц. Исходные для анализа данные нагрузки и шунта были сохранены в mat-файлах формата MATLAB, затем использованы в среде Simulink для верификации модели трансформатора тока.

В структуру на рис. 3 были подставлены параметры трансформатора:

$N_1 = 39$  – количество витков первичной обмотки;

$N_2 = 250$  – количество витков вторичной обмотки;

$l = 0,11$  м – эффективная длина магнитного пути;

$S = 162$  мм<sup>2</sup> – эффективное сечение сердечника;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная;

$\mu = 45$  – магнитная проницаемость сердечника;

$R_{2П} = 1,25$  Ом – сопротивление провода вторичной обмотки;

$R_{2Н} = 5,1$  Ом – сопротивление резистора нагрузки.

Полученная числовая модель была использована в Simulink в качестве эталона трансформатора для преобразования тока первичной цепи, измеренного на резисторе  $R_{ШУНТ}$ , и сравнения результата с напряжением на резисторе нагрузки вторичной цепи  $R_{2Н}$ .

На рис. 10 показаны данные измерений на выходе трансформатора в сравнении с выходом эталонной модели.

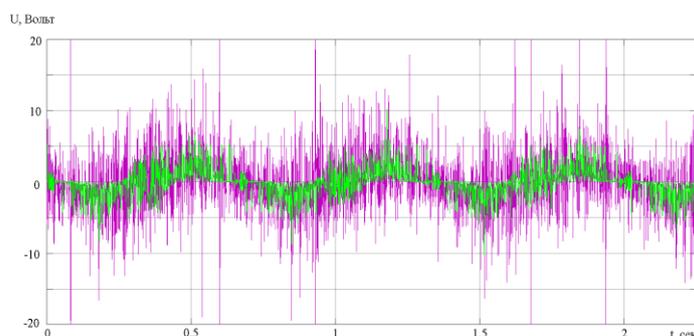


Рис. 10. Выход трансформатора (зеленый) и эталонной модели трансформатора (фиолетовый)

Ток, создаваемый импульсным генератором в первичной цепи, имеет ярко выраженный ступенчатый характер вследствие малости  $L_я$ , поэтому сигнал на выходе трансформатора (на рисунке показан зеленым цветом) сильно зашумлен после дифференцирования. Сигнал на выходе эталонной модели (на рисунке показан фиолетовым цветом) имеет более высокий уровень шума, что связано с заменой производной входного тока конечными разностями.

Те же сигналы после коррекции (15) с полюсами  $p_1 = 10$  и  $p_2 = 20$  представлены на рис. 11. Несмотря на высокий уровень шума исходного сигнала, на выходе цепей коррекции наблюдается сигнал, пригодный для замыкания местной обратной связи, в том числе для аналого-цифрового преобразования в случае цифровой реализации системы. Цепи коррекции, как отмечалось, обладают свойствами эффективного фильтра с высокими избирательными способностями, благодаря большому постоянному времени.

Графики на рис. 11 позволяют судить о соответствии свойств изготовленного корректирующего трансформатора его математической модели.

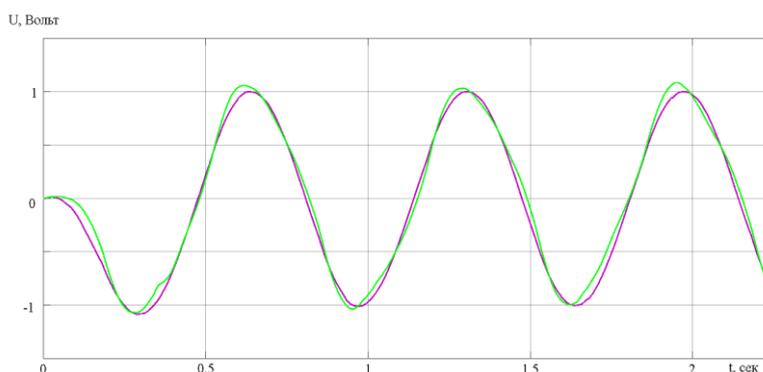


Рис. 11. Выход корректирующего устройства после трансформатора (зеленый) и после эталонной модели трансформатора (фиолетовый)

**Заключение.** Рассмотрен метод синтеза следящей системы на базе ДПТ с применением параллельной коррекции с трансформатором тока в местной обратной связи. Даны рекомендации по выбору параметров трансформатора.

Основными выражениями для расчета трансформатора тока с целью его применения для частотной коррекции следящего привода являются (19), (20), (25), (26), (28) при соблюдении условий (23), (24), (31), (32). Из этих выражений вытекают следующие рекомендации по проектированию трансформатора тока:

- ◆ выбирать сердечник из силовых марок магнитомягких материалов, чтобы получить максимально возможное значение  $B_{нас}$ ; хорошо подходят феррит 2500НМС1 и мо-пермаллой;
- ◆ увеличивать начальную индуктивность  $A_l$  путем выбора материала с большей магнитной проницаемостью  $\mu$ ; при этом нужно учесть, что при больших  $\mu$  магнитные свойства материала менее стабильны;
- ◆ увеличивать число витков вторичной обмотки  $N_2$ , чтобы увеличить полезный сигнал и ослабить высокочастотные наводки;
- ◆ число витков первичной обмотки  $N_1$  не влияет на отношение сигнал/шум, оно однозначно связано с  $A_l$  выражением (19):  $N_1$  уменьшается с возрастанием  $A_l$ ; не следует брать  $N_1$  существенно меньше, чем это следует из (19), так как это может привести к нарушению неравенства (23);
- ◆ диаметр провода первичной обмотки определяется не только его токонесущей способностью, но и допустимой степенью влияния трансформатора на цепь питания двигателя; имеет значение только сопротивление провода  $R_{лп}$ , а влиянием нагрузки трансформатора можно пренебречь, если придерживаться остальных рекомендаций;

- ◆ номинал резистора нагрузки  $R_{2H}$  следует уменьшать до некоторого предела, чтобы улучшить соотношение сигнал/шум; нижняя граница  $R_{2H}$  определяется сопротивлением провода вторичной цепи  $R_{2П}$  ( $R_{2H} > 3..4R_{2П}$ ) и максимально допустимой мощностью резистора.

Описанный в статье метод коррекции был применен при разработке аппаратуры управления следящего привода мощностью 1500 Вт на базе двигателя постоянного тока. В настоящее время опытный образец изделия находится на завершающей стадии испытаний.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блейз Е.С., Зимин А.В., Иванов Е.С. и др. Следящие приводы. В 3 т. – 2-е изд., доп. и перераб. / под ред. Б.К. Чемоданова. Т. I: Теория и проектирование следящих приводов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. - 904 с.
2. Isaac M. Horowitz. Synthesis of Feedback Systems. – New York: Academic press INC., 1963.
3. Chestnut H. and Meyer R.W. Servomechanisms and Regulating System Design. Vol. I. – New York: Wiley, 1955.
4. Гостев В.И., Гусовский С.В. Корректирующие устройства автоматики на несущей переменного тока: справочник. – Киев: Техника, 1981. – 208 с.
5. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления / под ред. Ю.И. Топчеева. – М.: Машиностроение, 1971. – 466 с. (Нелинейные системы автоматического управления). – 2 т.
6. Артым А.Д. Электрические корректирующие цепи и усилители. Теория и проектирование: научное издание. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 418 с.
7. Левицкий М.Я. Корректирующие устройства: научное издание. – Киев: Техника, 1969. – 190 с.
8. Пальтов И.П. Качество процессов и синтез корректирующих устройств в нелинейных автоматических системах: научное издание. – М.: Наука, 1975. – 367 с. (Теоретические основы технической кибернетики).
9. Лурье Б.Я., Энрайт П.Дж. Классические методы автоматического управления: учебное пособие / под ред. А.А. Ланнэ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
10. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления: в 3-х кн. / под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1973.
11. Goodwin G.C., Graebe S.F., and Salgado M.E. Control System Design. – Prentice Hall, 2001.
12. Корректирующие цепи в автоматике: сборник переводов статей / под ред. М.З. Литвина-Седого. – М.: Иностран. лит., 1954. – 268 с.
13. Основы автоматического регулирования: научное издание / под ред. В.В. Солодовникова. Т. 2. Элементы систем автоматического регулирования. Ч. 2. Корректирующие элементы и элементы вычислительных машин. – М.: Машгиз, 1959. – 451 с.
14. Antsaklis P.J., and A.N. Michel. Linear Systems. – McGraw-Hill, 1997.
15. Gao Z., Huang Y. and Han J. An Alternative Paradigm for Control System Design. Presented at the 40th IEEE.
16. Галиев А.Л., Галиева Р.Г. Элементы и устройства автоматизированных систем. – Уфа: Изд-во: Стерлитамакская академия, 2008. – 222 с.
17. Ogata K. Modern Control Engineering. – 3rd ed., Prentice Hall, 1997.
18. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Изд-во Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
19. Солодовников В.В. Синтез корректирующих устройств следящих систем при помощи оптимальных и типовых логарифмических частотных характеристик // Автоматика и телемеханика. – 1953. – Т. 14. – Вып. 5. – С. 531-555.
20. Franklin G.F., Powell J.D., and Emami-Naeimi A. Feedback Control of Dynamic Systems. – 3rd ed., Addison-Wesley, 1994.
21. Kuo B.C. Automatic Control Systems. – 7th ed., Prentice Hall, 1995.
22. Астапов Ю.М. Частотные методы анализа автоматических систем. Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Т. 14. Автоматическое управление. Теория. Редактор-составитель Е.А. Федосов. – М.: Машиностроение, 2000. – С. 38-43.

23. Feedback Control of Dynamic Systems, Fifth Edition, by Gene F. Franklin, J. David Powell, and Abbas Emami-Naeini. ISBN 0-13-149930-0. 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.
24. Rohrs C.E., Melsa J.L., and Schultz D.G. Linear Control Systems. – McGraw-Hill, 1993.

REFERENCES

1. Bleyz E.S., Zimin A.V., Ivanov E.S. *i dr.* Sledyashchie privody [The servo drives]. In 3 vol. 2nd ed., Ed. by B.K. Chemodanova. Vol. I: Teoriya i proektirovanie sledyashchikh privodov [Theory and design of servo drives]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1999, 904 p.
2. Isaac M. Horowitz. Synthesis of Feedback Systems. New York: Academic press INC., 1963.
3. Chestnut H. and Meyer R.W. Servomechanisms and Regulating System Design. Vol. I. New York: Wiley, 1955.
4. Gostev V.I., Gusovskiy S.V. Korrektiruyushchie ustroystva avtomatiki na nesushchey peremennogo toka: spravochnik [Corrective devices of automation at carrier AC: a Handbook]. Kiev: Tekhnika, 1981, 208 p.
5. Nelineynye korrektiruyushchie ustroystva v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya [Nonlinear corrective devices in the systems of automatic control], Under ed. Yu.I. Topcheeva. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 466 p. (Nelineynye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [the Nonlinear system automatic control]. 2 vol.).
6. Artym A.D. Elektricheskie korrektiruyushchie tsepi i usiliteli. Teoriya i proektirovanie: nauchnoe izdanie [Electric correction circuit and amplifiers. Theory and design: scientific publishing]. Moscow- Leningrad: Energiya, 1965, 418 p.
7. Levitskiy M.Ya. Korrektiruyushchie ustroystva: nauchnoe izdanie [Corrective device: a scientific publication]. Kiev: Tekhnika, 1969, 190 p.
8. Pal'tov I.P. Kachestvo protsessov i sintez korrektiruyushchikh ustroystv v nelineynykh avtomaticheskikh sistemakh: nauchnoe izdanie [The quality of processes and synthesis of correcting devices in nonlinear automatic systems: scientific publication]. Moscow: Nauka, 1975, 367 p. (Teoreticheskie osnovy tekhnicheskoy kibernetiki [Theoretical foundations of technical Cybernetics]).
9. Lur'e B.Ya., Enrayt P.Dzh. Klassicheskoe metody avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie [The classical methods of automatic control: textbook], Under ed. A.A. Lanne. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2004, 624 p.
10. Ustroystva i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya [Devices and elements of automatic control systems and control]: in 3 books, Under ed. V.V. Solodovnikova. Moscow: Mashinostroenie, 1973.
11. Goodwin G.C., Graebe S.F., and Salgado M.E. Control System Design. Prentice Hall, 2001.
12. Korrektiruyushchie tsepi v avtomatike: sbornik perevodov statey [Correction circuit in automation: a collection of translations of articles], Under ed. M.Z. Litvina-Sedogo. Moscow: Inostr. lit., 1954, 268 p.
13. Osnovy avtomaticheskogo regulirovaniya: nauchnoe izdanie [Fundamentals of automatic control: the scientific edition], Under red. V.V. Solodovnikova. Vol. 2. Elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Elements of automatic control systems]. Part 2. Korrektiruyushchie elementy i elementy vychislitel'nykh mashin [The corrective elements and the elements of computing machines]. Moscow: Mashgiz, 1959, 451 p.
14. Antsaklis P.J., and A.N. Michel. Linear Systems. McGraw-Hill, 1997.
15. Gao Z., Huang Y. and Han J. An Alternative Paradigm for Control System Design. Presented at the 40th IEEE.
16. Galiev A.L., Galieva R.G. Elementy i ustroystva avtomatizirovannykh sistem [Elements and devices of automated systems]. Ufa: Izd-vo Sterlitamaskaya akademiya, 2008, 222 p.
17. Ogata K. Modern Control Engineering. 3rd ed., Prentice Hall, 1997.
18. Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravleniya [Modern control system]. Moscow: Izd-vo Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002, 832 p.
19. Solodovnikov V.V. Sintez korrektiruyushchikh ustroystv sledyashchikh sistem pri pomoshchi optimal'nykh i tipovykh logarifmicheskikh chastotnykh kharakteristik [Synthesis of corrective devices, tracking systems by using the optimal model and the logarithmic frequency characteristics of], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1953, Vol. 14, Issue 5, pp. 531-555.

20. *Franklin G.F., Powell J.D., and Emami-Naeimi A.* Feedback Control of Dynamic Systems. 3rd ed., Addison-Wesley, 1994.
21. *Kuo B.C.* Automatic Control Systems. 7th ed., Prentice Hall, 1995.
22. *Astapov Yu.M.* Chastotnye metody analiza avtomaticheskikh sistem. Mashinostroenie. Entsiklopediya v soroka tomakh [Frequency methods of analysis of automatic systems. Engineering. The encyclopedia in forty volumes]. Vol. 14. Avtomaticheskoe upravlenie. Teoriya [Automatic control. Theory]. Edited and compiled by E.A. Fedosov. Moscow: Mashinostroenie, 2000, pp. 38-43.
25. Feedback Control of Dynamic Systems, Fifth Edition, by Gene F. Franklin, J. David Powell, and Abbas Emami-Naeini. ISBN 0-13-149930-0. 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.
23. *Rohrs C.E., Melsa J.L., and Schultz D.G.* Linear Control Systems. McGraw-Hill, 1993.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.Г. Цариченко.

**Кузин Юрий Рудольфович** – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: kuzin\_yr@bmstu.ru; 105005, г. Москва ул. 2-я Бауманская, 5; тел.: +79175790180; кафедра специальной робототехники и мехатроники – ст. преподаватель; НИИ Специального машиностроения – зав. сектором.

**Калинин Алексей Владимирович** – e-mail: kalinin\_mvту@mail.ru; тел.: +79032967362; к.т.н.; кафедра специальной робототехники и мехатроники – доцент; НИИ Специального машиностроения – зав. сектором.

**Гримак Дмитрий Сергеевич** – e-mail: gds.vse@gmail.com; тел.: +79265830227; НИИ Специального машиностроения; инженер 2-ой категории.

**Kuzin Yuriy Rudolfovich** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: kuzin\_yr@bmstu.ru; 5, 2nd Baumanskaya street, Moscow, 105005, Russia; phone: +79175790180; the department of special robotics and mechatronics – senior lecturer; NIISM – sector head.

**Kalinin Aleksey Vladimirovich** – e-mail: kalinin\_mvту@mail.ru; phone: +79032967362; the department of special robotics and mechatronics – associate professor; NIISM – sector head.

**Grimak Dmitriy Sergeevich** – e-mail: gds.vse@gmail.com; phone: +79265830227; NIISM; engineer.

УДК 004.272.2

**Е.С. Балака, Д.А. Городецкий, В.С. Рухлов, А.Н. Щелоков**

### **РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СУММАТОРОВ ПО МОДУЛЮ НА БАЗЕ КОМБИНАЦИОННЫХ СУММАТОРОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ПЕРЕНОСОМ\***

*Рост сложности вычислительных систем, обработка данных большой размерности ставят задачу поиска решений по усовершенствованию структуры вычислителей как на алгоритмическом, так и на аппаратном уровнях. Для обработки многоразрядных данных используются комбинационные параллельные сумматоры с регулярной структурой, обладающие высоким быстродействием. При этом, с увеличением разрядности входных данных, соответственно, увеличивается и длина цепи переносов. Вычисления в модулярной системе ведутся параллельно и независимо по модульным вычислительным каналам, разрядность которых меньше, чем разрядность исходных операндов, что дает возможность сократить число логических уровней цепи переноса относительно позиционной реализации. Рассматривается задача построения параллельного модульного сумматора на базе архи-*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-51-04006).

тектур комбинационных сумматоров с параллельным переносом (*Parallel Prefix Adder*) в рамках задач проектирования высокоскоростных модульных устройств. Архитектуры модульных сумматоров рассматриваются с позиций выбора оптимальных оснований модулярной арифметики. Применение специальных оснований вида  $(2^n \pm 1)$ , которые максимально приближены к степени двойки, позволяют использовать самые передовые архитектуры PPA с минимальным внесением избыточности. Для исследования были выбраны следующие модифицированные архитектуры деревьев формирования переноса PPA: Kogge-Stone, Knowles, Ladner-Fischer. Результаты моделирования построенных схем модульных сумматоров показали, что на малых разрядностях (до 64 бит) для сумматоров по модулю  $(2^n - 1)$  оптимальной является архитектура на базе модифицированного дерева переносов Kogge-Stone PPA, свыше 64 бит – архитектура на базе модифицированного дерева переносов Knowles PPA; для сумматоров по модулю  $(2^n + 1)$  оптимальной является архитектура на базе модифицированного дерева переносов Knowles PPA, свыше 32 бит – Ladner-Fischer PPA. Для обоих типов сумматоров с точки зрения аппаратных затрат наиболее эффективна реализация на базе Ladner-Fischer PPA.

*Модулярная арифметика; сумматоры по модулю с параллельным переносом; параллельные сумматоры с групповой организацией переносов; Kogge-Stone Adder; Knowles Adder; Ladner-Fischer Adder.*

**E.S. Balaka, D.A.Gorodecky, V.S. Rukhlov, A.N. Schelokov**

#### **DESIGN AND SYNTHESIS OF HIGH SPEED MODULO ADDERS USING PARALLEL PREFIX STRUCTURE**

*The growth of the complexity of computing systems, data processing of large dimension pose the problem of finding solutions to improve the structure of calculators both at algorithmic the hardware level. For multi-bit data processing the combinational high-speed Parallel Prefix Adders are used. Thus, with increase of input data bit width, carry chain length is increased respectively. The RNS is an arithmetic system which decomposes a number into parts (residues) and performs arithmetic operations in parallel for each residue without the need of carry propagation among them. It makes it possible to reduce the number of the carry chain logic levels relative to positional implementation. In this paper special modulo adders are implemented using parallel prefix structures like modified Kogge-Stone, Knowles, Ladner-Fischer. A comparative analysis has been made between various parallel prefix modulo architectures in terms of VLSI entities such as area and delay. The special moduli  $(2n \pm 1)$ , which are as close as possible to the power of two, allow the use of the most advanced architecture PPA with minimal introduction of redundancy. Simulation results of constructed schemes of modular adders have shown that modified Kogge-Stone PPA is the optimal architecture for modulo  $(2^n - 1)$  adders at low bit width (64 bit), for widths more than 64 bits - architecture based on the modified Knowles PPA. For modulo  $(2^n + 1)$  adders the best architecture is based on the modified Knowles PPA, for more than 32 bits – Ladner-Fischer PPA. For both types of adders, from hardware cost point of view, the most effective implementation is based on Ladner-Fischer PPA.*

*Residue Number System; Parallel Prefix Modulo Adder; Carry Save Adders; Kogge-Stone Adder; Knowles Adder; Ladner-Fischer Adder.*

**Введение.** В модулярной системе счисления любое целое число представляется в виде набора остатков от деления на основания (модули) модулярной системы. Отсутствие межразрядных связей при сложении, вычитании и умножении целых чисел является одной из наиболее привлекательных ее особенностей [1]. Тем самым возможно реализовывать вычислительные устройства на аппаратном уровне более эффективно, чем в позиционной системе. Результаты исследований последних лет [2–4] показывают, что модулярная арифметика так же эффективно показала себя в рамках задач уменьшения энергопотребления, не снижая производительности. Однако, существует ряд проблем, препятствующие широкому распространению использования средств на базе модулярной арифметики. В том числе это связано с отсутствием специализированных ячеек в рамках синтетических

библиотек современных САПР. К примеру, базовые методы RTL-синтеза включают учет характера арифметических операций, т.е. система сама определяет деревья арифметических операций в описании устройства и производит их оптимизацию с помощью технологии сохранения битов переноса (CSA) [5]. В рамках данной статьи рассматривается задача построения базовой операции модулярной арифметики, а именно операции сложения по спецмодулю на базе структур двоичных сумматоров с параллельным переносом.

**Parallel Prefix Adders.** Операция сложения двух двоичных чисел является одной из наиболее важных арифметических операций в цифровых системах. Параметры по быстродействию и потребляемой мощности двоичных сумматоров напрямую влияют на скорость обработки данных вычислительным устройством.

Основным параметром для усовершенствования архитектуры двоичного сумматора является задержка распространения в цепи переноса. С увеличением разрядности входных данных, соответственно, увеличивается длина цепи переносов. Для решения данной задачи современные САПР используют архитектуры двоичных сумматоров комбинационного типа, построенные на базе параллельных сумматоров с групповой организацией переносов (Parallel Prefix Adders, PPA) [6–8]. PPA на сегодняшний день считаются наиболее эффективными схемами для двоичного сложения в цифровых системах. Регулярная структура и высокая производительность делает их особенно привлекательными для реализации в рамках технологий СБИС (задержка PPA прямо пропорциональна числу уровней на стадии распространения переноса).

Архитектура PPA состоит из 3 уровней (рис. 1): на первом уровне выполняется ряд промежуточных предвычислений; на втором уровне строится дерево переносов; на третьем уровне формируется результат операции. Рассмотрим каждую стадию более подробно.

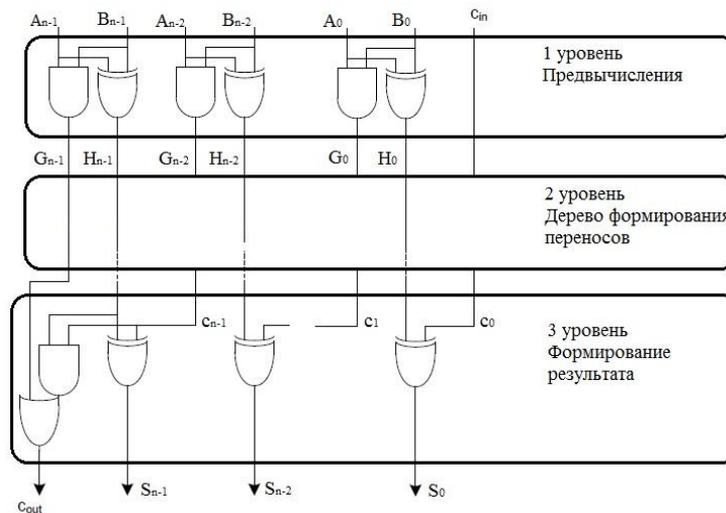


Рис. 1. Структура PPA

На этапе предвычислений вычисляются значения функций образования переноса (generate) и распространения переноса (propagate) для каждой пары битов входных операндов A и B:

$$G_i = A_i \cdot B_i,$$

$$H_i = A_i \oplus B_i.$$

На этапе формирования дерева переносов группа сигналов generate/propagate вычисляется для каждого бита по следующим уравнениям:

$$G_{i:j} = G_{i:k} + H_{i:k} \cdot G_{k-1:j}$$

$$H_{i:j} = H_{i:k} \cdot H_{k-1:j}$$

На финальном этапе определяются биты выходного результата и бита выходного переноса согласно формулам:

$$S_i = H_i \oplus G_{i:-1}$$

$$c_{out} = G_{n:-1},$$

где (-1) – значение входного переноса  $c_{in}$ .

Сигналы generate/propagate могут быть сгруппированы различными методами, на основе которых созданы различные семейства архитектур PPA [9]. В рамках данной работы, нас интересовали архитектуры с максимальным быстродействием. Поэтому, с учетом результатов мировых исследований, в качестве базовых архитектур двоичных PPA были выбраны следующие: Kogge-Stone [10], Knowles [11], Ladner-Fischer [12].

На рис. 2 для большей наглядности рассматриваемых архитектур, определены ячейки, которые используются при построении PPA.

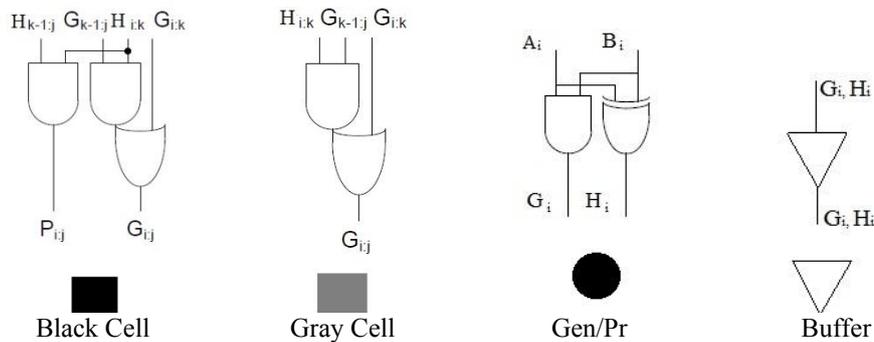


Рис. 2. Базовые ячейки PPA

Дерево переносов Kogge – Stone PPA относится к типу деревьев, которые используют наименьшее количество логических уровней. В работе [13] разработана улучшенная структура дерева, графовое представление для 8-битного сумматора отображено на рис. 3.

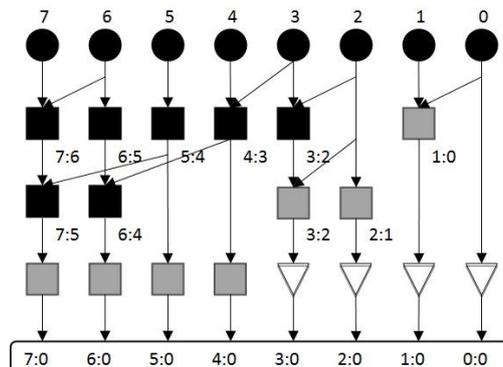


Рис. 3. Структура дерева переносов Kogge – Stone PPA

Knowles предложил семейство деревьев переноса с гибкой архитектурой. Например, структура 16-битного сумматора может иметь такие реализации дерева переноса, как Knowles [4,2,1,1], [4,4,2,1], [8,2,2,1], [8,4,1,1]. На рис. 4 показан граф дерева переноса для 8 битного сумматора.

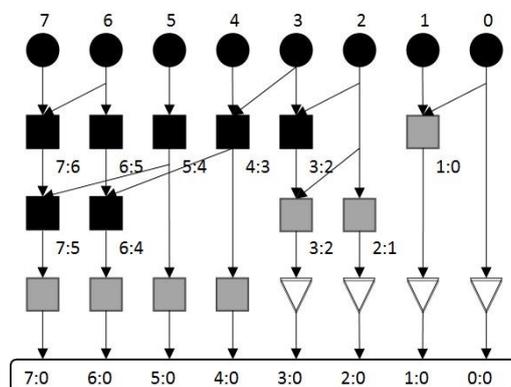


Рис. 4. Структура дерева переносов Knowles PPA

Дерево переносов Ladner-Fischer PPA является структурой, находящейся между двумя другими типами PPA – Brent-Kung [14] and Sklansky [15]. На рис. 5 представлен граф формирования переносов для 8-битного сумматора.

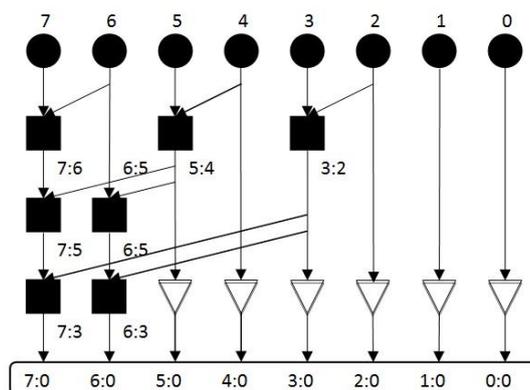


Рис. 5. Структура дерева переносов Ladner - Fischer PPA

**Сумматоры по модулю с PPA архитектурой.** Несмотря на то, что архитектуры PPA обсуждаются во многих статьях, методологии для их создания описываются весьма кратко. Что еще более важно, существует отсутствие понимания, каким образом та или иная архитектура реализуется на применяемой технологии. По мере развития технологий создания интегральных схем размеры схем становятся все меньше, тем самым возникают ограничения на характеристики двоичных сумматоров в нанометровом диапазоне. Кроме того, хороший дизайн-проект схемы зависит от компромисса между аппаратными, временными и мощностными затратами. Вычисления в модулярной системе ведутся параллельно и независимо по модульным вычислительным каналам, разрядность которых меньше, чем разрядность исходных операндов, что дает возможность сократить длину цепи переноса относительно позиционной реализации.

В общем случае сложение по модулю  $p$  вычетов  $A$  и  $B$  ( $0 \leq A, B < p$ ) определяется как:

$$S = |A + B|_p = \begin{cases} A + B - p, & \text{если } A + B \geq p, \\ A + B, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (1)$$

Структура модульного сумматора, согласно (1), включает пару двоичных сумматоров, компаратор и выходной мультиплексор. В работе [16] предложена параллельная структура сумматора, вычисляющая одновременно два значения:  $(A + B)$  и  $(A + B - p)$ . Данная структура известна как ELM Modular Addition (ELMMA) и является базовой, требующей минимальной «ручной работы» от разработчика.

Сумматор по модулю также возможно реализовать, используя архитектуры PPA. Однако, наиболее эффективно с точки зрения аппаратных и временных затрат для этих целей использовать специального вида основания, значения которых максимально приближены к степени двойки [17, 18].

**Сумматор по модулю  $2^n - 1$ .** Суммирование по модулю  $2^n - 1$  может быть выражено следующим уравнением:

$$|A + B|_{2^n - 1} = \begin{cases} |A + B + 1|_{2^n}, & \text{если } A + B \geq 2^n - 1, \\ A + B, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

Однако, сравнение  $A + B \geq 2^n - 1$  вычисляется не тривиально. Уравнение (2) может быть переписано, используя сравнение  $A + B \geq 2^n$  ( $c_{out} = 1$ ):

$$|A + B|_{2^n - 1} = \begin{cases} |A + B + 1|_{2^n}, & \text{если } A + B \geq 2^n, \\ A + B, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

В этом случае, значение выходного бита переноса  $c_{out}$  используется для корректировки выходного значения суммы, т.е. значение  $c_{out}$  прибавляется к значению суммы  $(A + B)$ . Однако, в этом случае, мы имеем двойное представление нуля  $0 = (000...0) = (111...1)$ . Структура сумматора приведена на рис. 6,а.

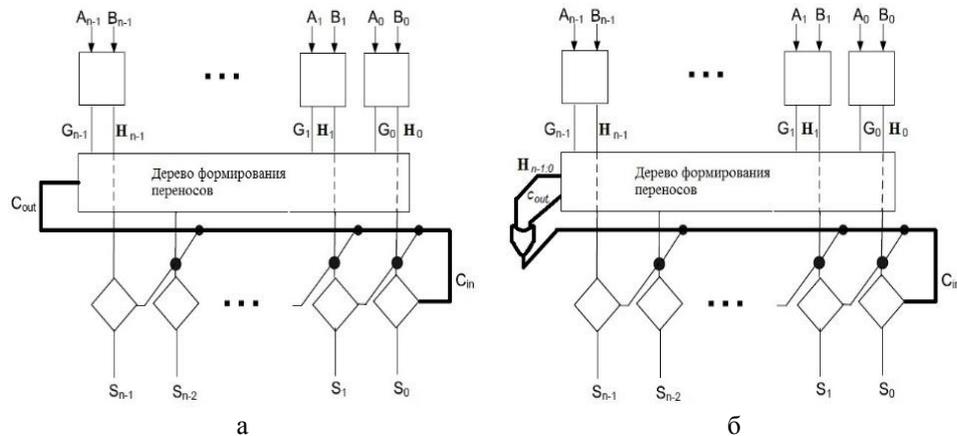


Рис. 6. Структура PPA сумматора по модулю  $(2^n - 1)$ : а – с двойным представлением нуля; б – с единственным представлением нуля

В случае, если требуется представление нуля единственным способом, то необходимо реализовывать уравнение (2). Сравнение  $A + B \geq 2^n - 1$  выполняется, если  $A + B \geq 2^n$  или  $A + B = 2^n - 1$ . Тогда значение  $1 = 111...1$ , которое соответствует сигналу распространения переноса  $H_{n-1:0}$ . Таким образом, такого вида сумматор так же может быть представлен, используя PPA структуру (рис. 6,б).

**Сумматор по модулю  $2^n + 1$ .** Операция сложения по модулю  $2^n + 1$  реализуется значительно сложнее, чем по модулю  $2^n - 1$ . Причина этому очевидна, если учесть, что требуется для получения  $|A + B|_p$  согласно уравнению (1). Арифмети-

ческие операции по данному модулю часто реализуют посредством использования другого представления входных данных, а именно число  $X > 0$  представляется его эквивалентом равным  $X - 1$ , обозначим его как  $\hat{X}$ . Значению нуля в данном случае не используется.

Суммирование по модулю  $2^n + 1$  может быть выражено следующим уравнением:

$$|\hat{A} + \hat{B} + 1|_{2^n+1} = \begin{cases} |\hat{A} + \hat{B}|_{2^n}, & \text{если } \hat{A} + \hat{B} + 1 \geq 2^n, \\ \hat{A} + \hat{B} + 1, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом,  $(\hat{A} + \hat{B})$ , если  $\hat{A} + \hat{B} + 1 < 2^n$ , т.е.  $c_{out} = 0$ , получаем структуру модульного PPA подобную сумматору по модулю  $2^n - 1$  с дополнением инвертора в цепи обратной связи формирования переноса (рис. 7).

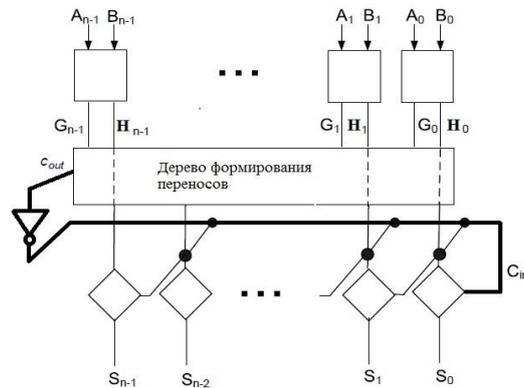


Рис. 7. Структура PPA сумматора по модулю  $(2^n + 1)$

**Схема экспериментов и результаты моделирования.** Для оценки эффективности рассмотренных архитектур сумматоров по модулям специального вида  $2^n \pm 1$  были созданы программные автоматизированные генераторы RTL-описания сумматоров на языке Verilog HDL для архитектур Kogge – Stone PPA (KS), Knowles PPA (Kn), Ladner – Fischer PPA (LF). Для проектирования в базе заказных СБИС использовался маршрут, включающий средства логического синтеза САПР Synopsys Design Compiler с минимизацией критического пути. Синтез проводился в базе стандартных ячеек свободно распространяемой библиотеки NangateOpenCellLibrary [19] с проектными нормами 45 нм. В таблицах 1 и 2 представлены результаты синтеза сумматоров по модулям  $2^n - 1$  и  $2^n + 1$ , соответственно. На рис. 8 и 9 представлены графики зависимости аппаратных и временных затрат от разрядности и используемой архитектуры для сумматоров по модулям  $2^n - 1$  и  $2^n + 1$ , соответственно.

Таблица 1

Результаты моделирования PPA сумматоров по модулю  $2^n - 1$

PPA	8 бит	16 бит	32 бит	64 бит	128 бит
<b>Задержка, нс</b>					
<b>KS</b>	0,41	0,55	0,72	1,73	3,8
<b>Kn</b>	0,43	0,62	0,77	1,98	2,3
<b>LF</b>	0,46	0,65	0,97	1,77	2,7
<b>Занимаемая площадь, мкм<sup>2</sup></b>					
<b>KS</b>	240	620	1527	3867	4369
<b>Kn</b>	233	492	1230	3854	4365
<b>LF</b>	195	473	1090	3721	4102

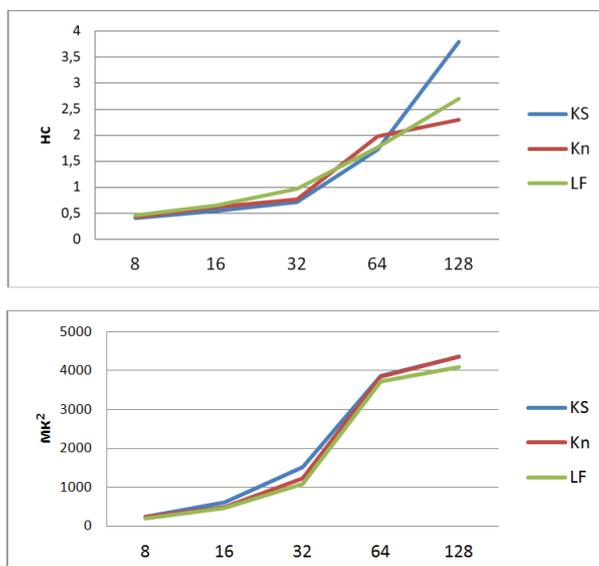


Рис. 8. График результатов моделирования сумматоров по модулю  $2^n - 1$  в зависимости от архитектуры и числа разрядов

Результаты моделирования построенных схем модульных сумматоров показали, что на разрядностях до 64 бит архитектура на базе модифицированного дерева переносов Kogge-Stone PPA выигрывает по быстродействию, но проигрывает по аппаратным затратам остальным рассматриваемым архитектурам. Свыше 64 бит можно наблюдать обратную картину архитектуры на базе Kogge-Stone PPA сильно начинает проигрывать архитектуре на базе Knowles PPA, оставаясь сравнимым с ним по аппаратным затратам. Архитектура на базе Ladner – Fischer PPA на всей размерности входных данных показала самые экономичные затраты.

Таблица 2

Результаты моделирования PPA сумматоров по модулю  $2^n + 1$

PPA	8 бит	16 бит	32 бит	64 бит	128 бит
<b>Задержка, нс</b>					
<b>KS</b>	0,62	1,03	1,12	2,1	4,1
<b>Kn</b>	0,61	0,89	1,04	1,84	3,58
<b>LF</b>	0,67	1,02	1,05	1,68	2,35
<b>Занимаемая площадь, мкм<sup>2</sup></b>					
<b>KS</b>	278	658	1582	3981	4524
<b>Kn</b>	279	563	1354	3954	4478
<b>LF</b>	264	524	1248	3893	4189

Результаты моделирования построенных схем модульных сумматоров показали, что на разрядностях до 32 бит архитектура на базе модифицированного дерева переносов Knowles PPA обладает наименьшими задержками и средними аппаратными затратами. Свыше 32 бит архитектура на базе Ladner – Fischer PPA наиболее эффективна как по задержкам, так и по аппаратным затратам.

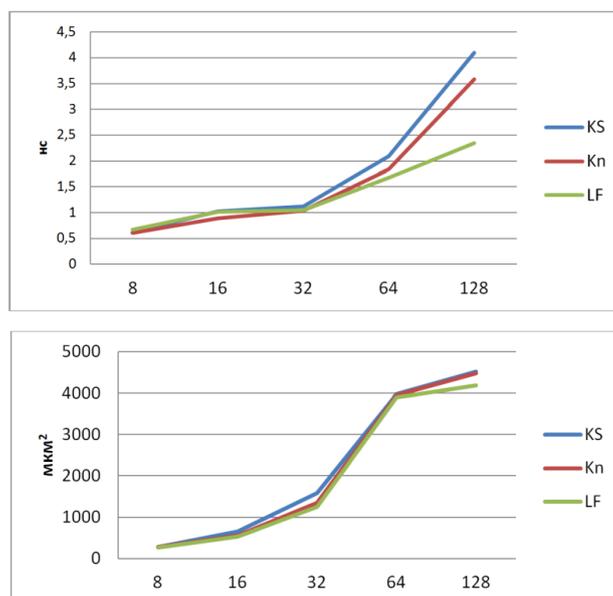


Рис. 9. График результатов моделирования сумматоров по модулю  $2^n + 1$  в зависимости от архитектуры и числа разрядов

**Заключение.** В работе рассматривается задача построения параллельного модульного сумматора на базе архитектур комбинационных сумматоров с параллельным переносом (Parallel Prefix Adder) в рамках задач проектирования высокоскоростных модульных устройств. Модулярная арифметика представляет собой непозиционную арифметику: при выполнении мультипликативных и аддитивных операций отсутствуют межразрядные переносы, что делает ее весьма привлекательной в области построения высокоскоростных вычислений, использующих целые числа большой разрядности. Однако, при проектировании устройств для обработки много-разрядных данных современные САПР используют регулярные структуры для построения комбинационных параллельных сумматоров, обладающие высоким быстродействием. Традиционными алгоритмами для построения сумматоров по модулю приблизиться по характеристикам к комбинационным PPA удастся только в частных случаях [20]. В данной работе архитектура модульных сумматоров рассматривается с позиций использования специальных оснований вида  $(2^n \pm 1)$ , которые максимально приближены к степени двойки, что позволяют использовать самые передовые архитектуры PPA с минимальным внесением избыточности.

В результате проведенных исследований, было выявлено, что архитектуру сумматоров по модулю  $2^n - 1$  целесообразно строить на базе семейства Knowles PPA. Т.к. данное семейство сумматоров обладает гибкой структурой, то необходимо провести дополнительные исследования в рамках построения сумматоров по модулю на его основе. Для сумматоров по модулю  $2^n + 1$  целесообразно использовать архитектуру на основе семейства Ladner – Fischer PPA.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «50 лет модулярной арифметике». Юбилейная Международная научно-техническая конференция (В рамках V Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика – 2005»): Сборник научных трудов. – М.: ОАО «Ангстрем», МИЭТ, 2006. – 775 с.

2. *Shalini R.V., Sampath, P.* Designing of Area and Power Efficient Modulo  $2N$  Multiplier // Eco-friendly Computing and Communication Systems (ICECCS), 2014. – 3rd International Conference on, On page(s). – P. 246-249.
3. *Azadeh Alsadat Emrani Zarandi, Amir Sabbagh Molahosseini, Mehdi Hosseinzadeh, Saeid Sorouri, Samuel Antão, and Leonel Sousa.* Reverse Converter Design via Parallel-Prefix Adders: Novel Components, Methodology, and Implementations // in IEEE Trans. on VLSI SYSTEMS., January 16, 2014.
4. *Chen J. and Hu J.* Energy-efficient digital signal processing via voltageover scaling-based residue number system // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst. – Jul. 2013. – Vol. 21, No. 7. – P. 1322-1332.
5. *Кравченко В., Радченко Д.* Современные технологии RTL-синтеза в продуктах компании Synopsys // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 2. – С. 66-69.
6. *Sudheer Kumar Yezerla, B RajendraNaik.* Design and Estimation of delay, power and area for Parallel prefix adders // Recent Advances in Engineering and Computational Sciences. – 2014. – Vol. 2. – P. 1-6.
7. *Sunitha P.* A Novel Approach For Designing A Low Power Parallel Prefix Adders. – October 2012. – Vol. 1, Issue 8.
8. *Padmajarani S.V., and Muralidhar M.* A New Approach to implement Parallel Prefix Adders in an FPGA. A Novel Approach For Designing A Low Power Parallel Prefix Adders. – 2012. – P. 1524-1528.
9. *Naganathan Vignesh.* A Comparative Analysis of Parallel Prefix Adders in 32 nm and 45 nm static CMOS Technology. Dissertations. The University of Texas at Austin, 2015.
10. *Kogge P. and Stone H.* A parallel algorithm for the efficient solution of a general class of recurrence relations // IEEE Transactions on Computers. – 1973. – Vol. C-22. – P. 786-793.
11. *Knowles S.* A family of adders // Proceedings of the 15th IEEE Symposium on Computer Arithmetic. – June 2001. – P. 277-281.
12. *Ladner R. and Fischer M.* Parallel prefix Computation // Journal of the ACM. – 1980. – Vol. 27. – P. 831-838.
13. *CH. Pavan Kumar and K. Sivani.* Implementation of Efficient Parallel Prefix Adders for Residue Number System // Int. J. Com. Dig. Sys. 4, o.4 (Oct-2015). – P. 295-300.
14. *Brent R.P. and Kung H.T.* A regular layout for parallel adders // IEEE Transactions on Computers. – 1982. – Vol. C-31. – P. 260-264.
15. *Sklansky J.* Conditional-sum addition logic // IRE Transactions on Electronic Computers. – 1960. – Vol. EC-9. – P. 226-231.
16. *Omondi Amos, Premkumar Benjamin,* Eds., Residue Number Systems: Theory and Implementation (Advances in Computer Science and Engineering Texts) London, UK: Imperial College Press, September 10, 2007).
17. *Jaberipur and S. Nejati.* Balanced minimal latency RNS addition for moduli set  $\{2n-1, 2n, 2n+1\}$  // in Proc. 18th Int. Conf. Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). – 2011. – P. 1-7.
18. *Jaberipur G. and Parhami B.* “Unified Approach to the Design of Modulo- $(2n+1)$  Adders Based on Signed-LSB Representation of Residues,” // Proc. 19th IEEE Symp. Computer Arithmetic. – 2009. – P. 57-64.
19. NanGate 45nm Open Cell Library. – Режим доступа: <http://www.nangate.com/> (дата обращения: 28.04.2016).
20. *Балака Е.С. Тельпухов Д.В., Осинин И.П., Городецкий Д.А.* Сравнительное исследование и анализ методов аппаратной реализации сумматоров по модулю // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. – 2016. – № 1 (23). – URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2887> (дата обращения: 28.04.2016).

#### REFERENCES

1. «50 let modulyarnoy arifmetike». Yubileynaya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya (V ramkakh V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektronika i informatika – 2005»): Sbornik nauchnykh trudov [Collection of scientific works Anniversary International Scientific Conference "50 years of Residue Number System"]. Moscow: OAO «Angstrom», MIET, 2006, 775 p.

2. Shalini R.V., Sampath, P. Designing of Area and Power Efficient Modulo  $2N$  Multiplier, *Eco-friendly Computing and Communication Systems (ICECCS)*, 2014. 3rd International Conference on, On page(s), pp. 246-249.
3. Azadeh Alsadat Emrani Zarandi, Amir Sabbagh Molahosseini, Mehdi Hosseinzadeh, Saeid Sorouri, Samuel Antão, and Leonel Sousa. Reverse Converter Design via Parallel-Prefix Adders: Novel Components, Methodology, and Implementations, in *IEEE Trans. on VLSI SYSTEMS*, January 16, 2014.
4. Chen J. and Hu J. Energy-efficient digital signal processing via voltageover scaling-based residue number system, *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst.*, Jul. 2013, Vol. 21, No. 7, pp. 1322-1332.
5. Kravchenko V., Radchenko D. Sovremennye tekhnologii RTL-sinteza v produktakh kompanii Synopsys [Modern technology RTL-synthesis products from Synopsys], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2005, No. 2, pp. 66-69.
6. Sudheer Kumar Yezerla, B RajendraNaik. Design and Estimation of delay, power and area for Parallel prefix adders, *Recent Advances in Engineering and Computational Sciences*, 2014, Vol. 2, pp. 1-6.
7. Sumitha P. A Novel Approach For Designing A Low Power Parallel Prefix Adders, October 2012, Vol. 1, Issue 8.
8. Padmajarani S.V., and Muralidhar M. A New Approach to implement Parallel Prefix Adders in an FPGA. A Novel Approach For Designing A Low Power Parallel Prefix Adders, 2012, pp. 1524-1528.
9. Naganathan Vignesh. A Comparative Analysis of Parallel Prefix Adders in 32 nm and 45 nm static CMOS Technology. Dissertations. The University of Texas at Austin, 2015.
10. Kogge P. and Stone H. A parallel algorithm for the efficient solution of a general class of recurrence relations, *IEEE Transactions on Computers*, 1973, Vol. C-22, pp. 786-793.
11. Knowles S. A family of adders, *Proceedings of the 15th IEEE Symposium on Computer Arithmetic*, June 2001, pp. 277-281.
12. Ladner R. and Fischer M. Parallel prefix Computation, *Journal of the ACM*, 1980, Vol. 27, pp. 831-838.
13. CH. Pavan Kumar and K. Sivani. Implementation of Efficient Parallel Prefix Adders for Residue Number System, *Int. J. Com. Dig. Sys. 4, o.4 (Oct-2015)*, pp. 295-300.
14. Brent R.P. and Kung H.T. A regular layout for parallel adders, *IEEE Transactions on Computers*, 1982, Vol. C-31, pp. 260-264.
15. Sklansky J. Conditional-sum addition logic, *IRE Transactions on Electronic Computers*, 1960, Vol. EC-9, pp. 226-231.
16. Omondi Amos, Premkumar Benjamin, Eds., Residue Number Systems: Theory and Implementation (Advances in Computer Science and Engineering Texts) London, UK: Imperial College Press, September 10, 2007).
17. Jaberipur and S. Nejati. Balanced minimal latency RNS addition for moduli set  $\{2n-1, 2n, 2n+1\}$ , in *Proc. 18th Int. Conf. Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, 2011, pp. 1-7.
18. Jaberipur G. and Parhami B. Unified Approach to the Design of Modulo- $(2n+1)$  Adders Based on Signed-LSB Representation of Residues, *Proc. 19th IEEE Symp. Computer Arithmetic*, 2009, pp. 57-64.
19. NanGate 45nm Open Cell Library. Available at: <http://www.nangate.com/> (accessed 28 April 2016).
20. Balaka E.S. Tel'pukhov D.V., Osinin I.P., Gorodetskiy D.A. Sravnitel'noe issledovanie i analiz metodov apparatnoy realizatsii summatorov po modulyu [Comparative study and analysis methods hardware implementation RNS-based Adders], *Universum: Tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn.* [Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal], 2016, No. 1 (23). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2887> (accessed 28 April 2016).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Л. Глебов.

**Щелоков Альберт Николаевич** – Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН; e-mail: [schan@iprm.ru](mailto:schan@iprm.ru); Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3; тел.: +74997299890; с.н.с.; к.ф.-м.н.

**Балака Екатерина Станиславовна** – e-mail: balakaes@yandex.ru; тел.: +79067389568; с.н.с.

**Рухлов Владимир Сергеевич** – e-mail: do1p@ya.ru; тел.: +79167866596; м.н.с.

**Городецкий Данила Андреевич** – Объединенный институт проблем информатики НАНБ; e-mail: danila.gorodecky@gmail.com; 220012, Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 6; к.т.н.

**Schelokov Albert Nikolaevich** – Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science; e-mail: schan@ippm.ru; 3, Sovetskaya street, Zelenograd, Moscow; phone: +74997299890; senior researcher; cand. of phys.-math. sc.

**Balaka Ekaterina Stanislavovna** – e-mail: balakaes@yandex.ru; phone: +79067389568; senior researcher; cand. of eng. sc.

**Rukhlov Vladimir Sergeevich** – e-mail: do1p@ya.ru; phone: +79167866596; junior researcher.

**Gorodecky Danila Andreevich** – The State Scientific Institution "The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus" (UIIP NASB); e-mail: danila.gorodecky@gmail.com; 6, Surganova street, Minsk, 220012, Belarus; cand. of eng. sc.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 10 и не более 18 страниц. Текст набирается в соответствии с правилами компьютерного набора с одной стороны белого листа бумаги стандартного формата (А 4). На странице должно быть не более 28 строк, 60 знаков в каждой строке, отпечатанных через 1,5 интервала (это относится к таблицам и примечаниям). Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант. Редактор Word 7 for Windows, шрифт Times New Roman, размер 14. Поля: правое – 1 см, левое – 3 см, верхнее и нижнее – 2 см.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи и фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом не менее 200-250 слов. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. После названия статьи приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка обязательно. В тексте должны быть ссылки в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отправлять авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.**