

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.

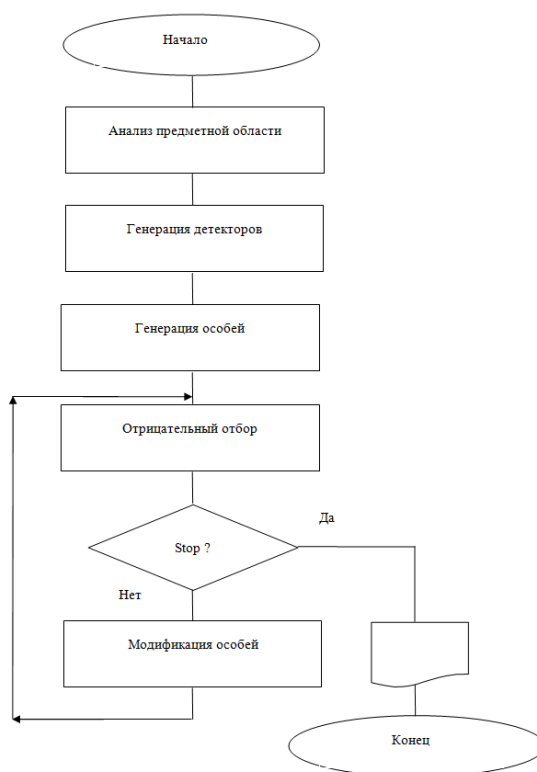


Рис. 1. Структурная схема алгоритма решения нечеткой оптимизационной задачи на основе методов искусственных иммунных систем

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».

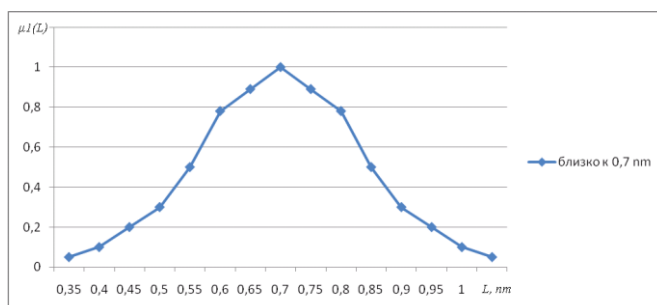


Рис. 2. График функции зависимости принадлежности к условию «близко к 0,7 нм» от длины полупериметра

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 $\mu_2(L)$.

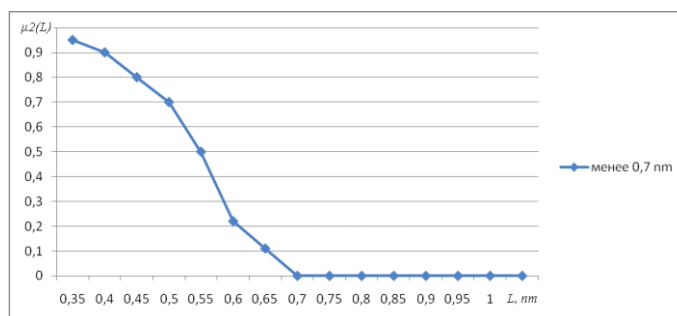


Рис. 3. График функции зависимости принадлежности к условию «меньше 0,7 нм» от длины полупериметра

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.

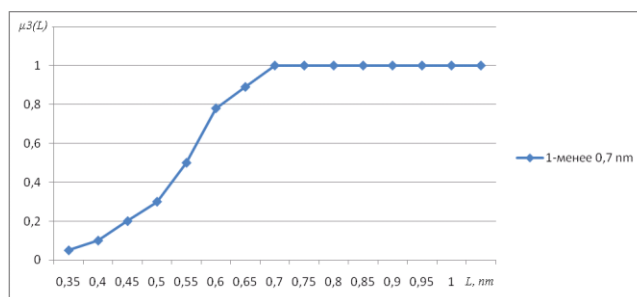


Рис. 4. График функции зависимости принадлежности к условию декодера от длины полупериметра

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.

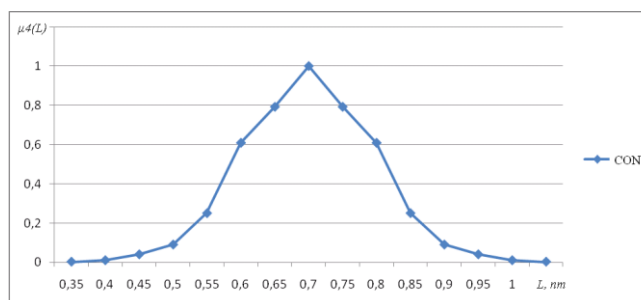


Рис. 5. График функции зависимости принадлежности к условию «очень близко к $0,7$ nm» от длины полупериметра

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 $\mu_5(L)$.

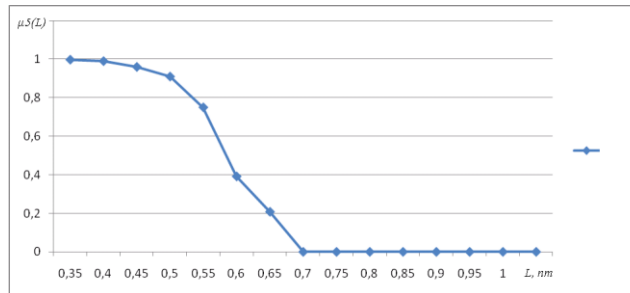


Рис. 6. График функции зависимости принадлежности к условию «очень меньше 0,7 нм» от длины полупериметра

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.

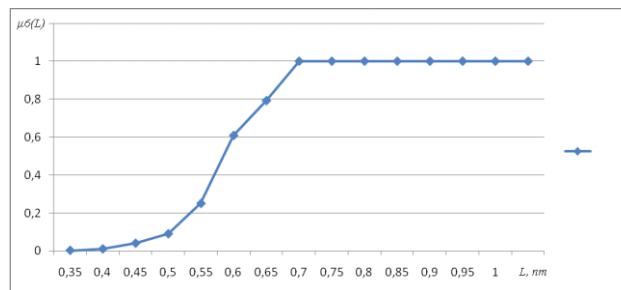


Рис. 7. График функции зависимости принадлежности к условию декодера от длины полупериметра

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.

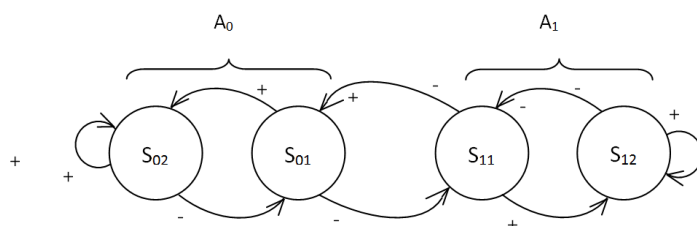


Рис. 8. Граф-схема переходов автомата адаптации

Введем переменную μ_{\min} , описывающую минимально допустимое значение функции декодера μ , соответствующее критической ситуации. Правила выработки управляющих сигналов АА (рис. 8), с использованием μ_{\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 интелект. 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.
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 primenenie 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.

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).