

19. Kacprzyk J., Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Experimental investigation of algorithms developed, *Studies in Computational Intelligence*, 2009, No. 212, pp. 211-223+227-236.
20. IBM-PLACE 2.0 benchmark suits. Available at: <http://er.cs.ucla.edu/benchmarks/ibm-place2/bookshelf/ibm-place2-all-bookshelf-nopad.tar.gz>.

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

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.

Курейчик Владимир Владимирович – e-mail: kureichik@yandex.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования.

Kureichik VladimirVictorovich – 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. sci.; professor.

Kureichik Vladimir Vladimirovich – e-mail: kureichik@yandex.ru; the department of computer aided design.

УДК 681.3

Ю.О. Чернышев, Н.Н. Венцов, П.А. Панасенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ АДАПТИВНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ*

Проанализированы варианты формирования обобщенной функции принадлежности расплывчатых оценок решений оптимизационных задач. Проблема заключается в наделении адаптивными свойствами процесса формирования функции принадлежности, объединяющей (обобщающей) требования экспертов, сформулированные в разрешающей и запрещающей форме. Под адаптивностью понимается изменение области допустимых решений, описываемой обобщенной функцией принадлежности, в зависимости от жесткости требований предъявляемых к проектируемому изделию. Адаптация достигается за счет применения различных вариантов вычисления операции импликации в соответствии с логиками Райхенбаха, Рейчер-Геинеса и Лукасевича. Показано, что для четкого разделения на допустимые и запрещенные решения необходимо использовать логику Рейчер-Геинеса, а для расплывчатого – Райхенбаха, и Лукасевича. Адаптирующие воздействия, изменяющие области запрещенных/допустимых решений, можно задавать, используя оператор CON. Даны оценки множествам нечеткого уровня 1, 0,85, 0,5, образованным при помощи вычисления импликаций на основе логик Райхенбаха, Рейчер-Геинеса и Лукасевича.

Адаптация; нечеткие системы; множество уровня; импликация; интеллектуальные методы.

Yu.O. Chernyshev, N.N. Ventsov, P.A. Panasenko

STUDY ON OPTIONS FOR ADAPTIVE ANALYSIS OF THE SOLUTIONS OF OPTIMIZATION PROBLEMS

Analyzed options for the development of the generalized membership function fuzzy estimates of solutions to optimization problems. The problem lies in allotment the adaptive properties of the formation process of membership function, combining (generalizing) requirements experts, formulated in permitting and prohibiting the form. Under the adaptability refers to the change in the area of feasible solutions is described by a generalized membership function, depending on the

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-01-00343, 15-01-05129).

stiffness of the requirements for the projected izdeliya. Adaptation is achieved through the use of different variants of calculation operations implications in accordance with ones of Reichenbach, Racer-Gaines and Lukasiewicz. It is shown that for a clear distinction between the permissible and prohibited the solutions you need to use logic Racer-Gaines, and vague - Reichenbach, and Lukasiewicz. Adapting to the impacts that changes the Smoking area/valid solutions can be set using the operator CON. Estimates of the fuzzy sets of level 1 to 0.85, 0.5, and educated by computing implications based on the logics of Reichenbach, Racer-Gaines and Lukasiewicz.

Adaptation of fuzzy system; many levels; implication; intellectual methods.

Введение. Решение современных проектных задач требует привлечения специалистов в области электро и теплотехники, гидравлики, механики и т.д. Над многими узлами современных изделий могут одновременно работать сразу несколько разнопрофильных специалистов, каждый из которых будет по-своему понимать влияние параметров математической модели задачи как на совместно проектируемый ими узел, так и на изделие в целом. Известно, что для одних и тех же проектных процедур в одних случаях необходимо получать точные решения, а в других достаточно получения приближенных решений [1]. По этой причине активно ведутся разработки, направленные на интеллектуализацию вычислительных процессов [2–7].

Второй важной причиной интеллектуализации является противоречивость требований, предъявляемым к изделиям, например, уменьшение площади схемы позволяет сократить длину связей элементов, а также уменьшить временные задержки между компонентами схемы [2, 3], но в тоже время, может затруднить отвод тепла. По этому лицу, принимающему окончательное решение, а так же профильным специалистам необходимо не только свести в единую систему требования/пожелания всех экспертов, но и наделить данную систему адаптивными свойствами. Поскольку найти решение, полностью удовлетворяющее всем пожеланиям экспертов, не всегда возможно, область поиска расширяют за счет анализа частично допустимых решений.

На основании выше изложенного актуальной задачей исследования является разработка адаптивных алгоритмов оценки соответствия текущих решений оптимизационных задач нечетким ограничениям. Одним из направлений решения данной проблемы является разработка эволюционных алгоритмов, например искусственных иммунных систем [5, 6, 8–10]. Способы адаптивного задания нечетких команд на основе лингвистических переменных приведены в работах [10–12].

Постановка задачи адаптивной формализации нечетких требований. Известно что формализовать требования одного эксперта можно при помощи функции принадлежности $\mu(x)$, описывающей степень соответствия аргумента функции x некоторому условию [4]. Если в качестве оценки размера схемы взять длину ее полупериметра L , то функция $\mu r_i(L)$ допустимость создания схемы с длиной полупериметра L по мнению i -го эксперта, а $\mu z_i(L)$ – недопустимость. Каждому эксперту достаточно задать одну из функций $\mu r_i(L)$ или $\mu z_i(L)$.

Тогда обобщенную функцию μr , описывающую целесообразность создания схемы с длиной полупериметра L по мнению всех экспертов можно получить при помощи операторов конъюнкции или дизъюнкции: т.е. $\mu r(L) = \& \mu r_i(L)$ или $\mu r(L) = \vee \mu r_i(L)$. Аналогично рассуждая можно получить различные варианты функции μz .

Ситуация усложняется одновременно присутствуют функции $\mu r_i(L)$ и $\mu z_j(L)$ т.е. одни эксперты дают рекомендации в разрешающей а другие в запрещающей форме. На рис. 1 графики описывают в нечеткой форме степени принадлежности размещения элементов, характеризуемых длиной полупериметра L к разрешающему $rL(L)$ и запрещающему $zL(L)$ правилу, т.е. график $rL(L)$ соответствует функции $\mu r(L)$, а график $zL(L)$ – $\mu z(L)$. Необходимо разработать алгоритмический аппарат, позволяющий на основе анализа текущего состояния вычислительного процесса корректировать требования к решению задач оптимизации. С целью получения некоторой обобщающей нечеткой функции, характеризующей целесообраз-

ность размещения элементов на основе длины полупериметра, описывающего данные элементы, определим различные варианты применения к $rL(L)$ и $zL(L)$ операторов импликации.

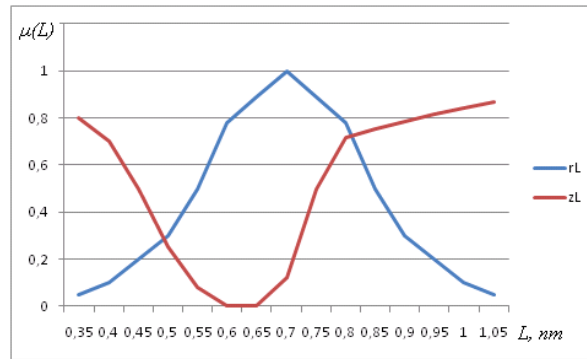


Рис. 1 Исходные графики принадлежности длины полупериметра L к разрешающему и запрещающему правилу

Импликация по Райхенбаху μR определяется на основе формулы [13]:

$$\mu R(x,y)=1-x+x*y, \quad (3)$$

где $x,y \in [0,1]$.

На рис. 2 приведен график, полученный в результате вычисления $\mu R(rL(L),zL(L))$.

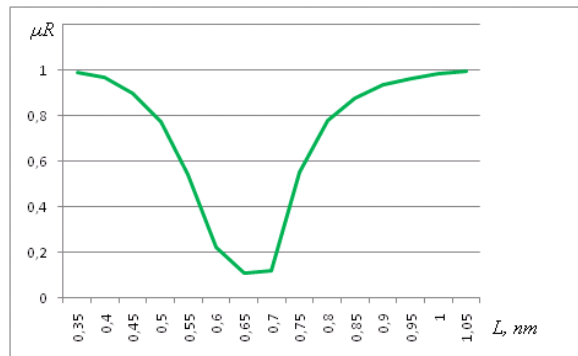


Рис. 2. График изменения степени принадлежности, полученный в результате применения операции $\mu R(rL(L),zL(L))$

Импликация по Лукасевичу μL определяется на основе формулы [13]:

$$\mu L(x,y)=\min(1-x+y;1). \quad (4)$$

На рис. 3 приведен график, полученный в результате вычисления $\mu L(rL(L),zL(L))$.

Сопоставив графики, отображенные на рис. 2, 3, можно сделать заключение, что в области значений, близких к 1 импликация $\mu L(rL(L),zL(L))$ обеспечивает более расплывчатое описание степени принадлежности по сравнению с $\mu R(rL(L),zL(L))$. Например, в точке $L=0,5$ функция $\mu L(rL(0,5),zL(0,5))=0,95$ и $\mu R(rL(0,5),zL(0,5))=0,775$, а в точке $L=0,8$ $\mu L(rL(0,8),zL(0,8))=0,94$ и $\mu R(rL(0,8),zL(0,8))=0,779$. При этом, в области наименьших значений импликации практически совпадают $\mu L(rL(0,65),zL(0,65))=0,11$ и $\mu R(rL(0,65),zL(0,65))=0,1$.

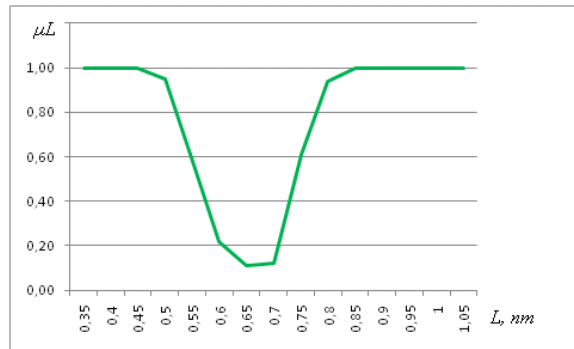


Рис. 3. График изменения степени принадлежности, полученный в результате применения операции $\mu L(rL(L), zL)$

Импликация по Рейчер-Геинесу задается формулой [13]:

$$\mu RG(x, y) = \begin{cases} 1, & x \leq y \\ 0, & x > y \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 4 приведен график изменения степени принадлежности, полученный в результате вычисления $\mu RG(rL(L), zL(L))$.

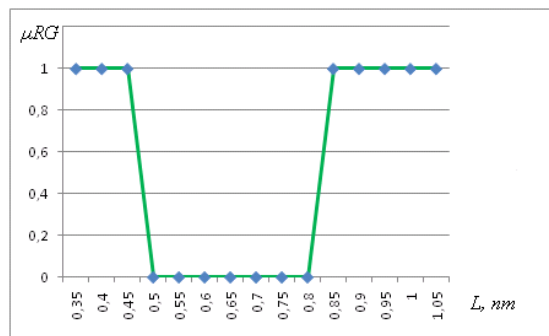


Рис. 4. График изменения степени принадлежности, полученный в результате применения операции $\mu RG(zL(L), rL(L))$

Анализ вариантов адаптации нечетких требований. Анализируя данные, представленные на рис. 1 – рис. 4, можно заключить, что в точках $\mu R(rL, zL) \approx 1$, $\mu L(rL, zL) \approx 1$ и $\mu RG(rL, zL) = 1$ запрещающие условия доминируют над разрешающими. При этом, в точках L таких, что $\mu R(rL, zL, L) = 1$, $\mu L(rL, zL, L) = 1$, $\mu RG(rL, zL, L) = 1$, можно говорить о том, что решения полностью (точно) соответствуют запрещенному набору решений.

Значения L , для которых $\mu(L) = 1$ образуют множество нечеткого уровня 1 $A_{\mu=1}$ [14]. В случае, если данное множество не является пустым, в качестве оценки его мощности будем использовать разность Raz между его наибольшим и наименьшим элементом. Если множество состоит из нескольких не пересекающихся подмножеств, то оценка будет заключаться в сумме соответствующих разностей. Для рассматриваемого случая: $A_{\mu R(rL, zL, L)=1} = \emptyset$, $A_{\mu L(rL, zL, L)=1} \neq \emptyset$, $A_{\mu RG(rL, zL, L)=1} \neq \emptyset$, $Raz(A_{\mu R(rL, zL, L)=1}) = 0$, $Raz(A_{\mu L(rL, zL, L)=1}) = 0.3$, $Raz(A_{\mu RG(rL, zL, L)=1}) = 0.3$.

В теории оптимизации, по умолчанию, допустимой считается погрешность в 15% поэтому в качестве оценки множества допустимых решений можно использовать множество нечеткого уровня 0,85. С учетом дискретности области определе-

ния, определим мощности множеств уровня 0,85: $A_{\mu R(rL,zL,L)=0,85} \neq \emptyset$, $A_{\mu L(rL,zL,L)=0,85} \neq \emptyset$, $A_{\mu RG(rL,zL,L)=0,85} \neq \emptyset$, $Raz(A_{\mu R(rL,zL,L)=0,85})=0.3$, $Raz(A_{\mu L(rL,zL,L)=0,85})=0.4$, $Raz(A_{\mu RG(rL,zL,L)=0,85})=0.3$.

В теории нечетких множеств имеется термин *точка перехода* – значение у аргумента нечеткой функции принадлежности μ для которого $\mu(y)=0,5$ [15]. С учетом дискретности области определения, получим мощности множеств уровня 0,5: $A_{\mu R(rL,zL,L)=0,5} \neq \emptyset$, $A_{\mu L(rL,zL,L)=0,5} \neq \emptyset$, $A_{\mu RG(rL,zL,L)=0,5} \neq \emptyset$, $Raz(A_{\mu R(rL,zL,L)=0,5})=0.5$, $Raz(A_{\mu L(rL,zL,L)=0,5})=0.5$, $Raz(A_{\mu RG(rL,zL,L)=0,5})=0.3$. Для наглядности на основе данных о множествах нечеткого уровня сформируем таблицу 1.

Таблица 1

Сопоставление импликаций $\mu(rL(L),zL(L))$

№ п/п	Уровень нечеткого множества	$Raz(A_{\mu R(rL,zL,L)})$	$Raz(A_{\mu L(rL,zL,L)})$	$Raz(A_{\mu RG(rL,zL,L)})$
1	1	0	0,3	0,3
2	0,85	0,3	0,4	0,3
3	0,5	0,5	0,5	0,3

Одним из способов повышения четкости трактовки результатов является применение операции $CON(\mu(x))=\mu(x)*\mu(x)$ [4]. В этой связи отразим в табл. 2 значения $Raz(A_{CON(\mu R(rL,zL,L))})$, $Raz(A_{CON(\mu L(rL,zL,L))})$, $Raz(A_{CON(\mu RG(rL,zL,L))})$ для нечетких множеств уровня 1, 0,85, 0,5.

Таблица 2

Сопоставление импликаций $CON(\mu(rL,zL))$

№ п/п	Уровень нечеткого множества	$Raz(A_{CON(\mu R(rL,zL,L))})$	$Raz(A_{CON(\mu L(rL,zL,L))})$	$Raz(A_{CON(\mu RG(rL,zL,L))})$
1	1	0	0,3	0,3
2	0,85	0,2	0,4	0,3
3	0,5	0,4	0,5	0,3

Сопоставив данные представленные в табл. 1, 2 можно сформировать схему адаптивной корректировки нечетких требований. Например, если допускается погрешность 15 % по соответствию некоторого решения заданным требованиям, то при заданном уровне дискретизации самым жестким критерием будет $Raz(A_{CON(\mu R(rL,zL,L))})$, а самыми лояльными $Raz(A_{\mu L(rL,zL,L)})$ и $Raz(A_{CON(\mu L(rL,zL,L))})$. На основе данных, представленных в табл. 1, 2 можно составить упорядоченный массив четкости критериев $[Raz(A_{CON(\mu R(rL,zL,L))}), \{Raz(A_{\mu R(rL,zL,L)}), Raz(A_{\mu RG(rL,zL,L)}), Raz(A_{CON(\mu L(rL,zL,L))}), Raz(A_{CON(\mu RG(rL,zL,L))})\}, Raz(A_{CON(\mu L(rL,zL,L))})]$. Помещенные в фигурные скобки множества нечеткого уровня, эквивалентны между собой в заданных условиях задачи.

Заключение. Предложена схема адаптивной корректировки нечетких требований к задачам оптимизации, заданных в разрешающей и запрещающей форме. Таким образом, в случае, если необходимо четко разграничить область решений на допустимые и запрещенные целесообразно использовать операцию импликации по Рейчер-Геинесу. В случае если необходимо обеспечить вариативность классификации решений за счет нечетких значений можно использовать сначала операцию импликации по Лукасевичу а затем по Райхенбаху. Данную процедуру можно формализовать, используя S-нечеткие линейно упорядоченные множества, как набор лингвистических значений переменной «сопоставление по ...» =(Рейчер-Геинесу, Лукасевичу, Райхенбаху). Свойство упорядоченности не требует вычисления расстояний между элементами, но позволяет задавать операторы сдвига и

инверсии. При создании адаптивных механизмов реализация операции сдвига, может быть использована для локальных корректировок, например, перехода от логики Лукасевича к логике Райхенбаха или Рейчер-Геинеса, а операция инверсии для более существенных, например, переход от логики Рейчер-Геинеса к логике Райхенбаха. Наделить данную систему инерционностью можно используя автоматы адаптации, чем больше состояний автомата адаптации соответствуют альтернативам (т.е. применению одной из логик) тем более инерционна система.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *Лебедев Б.К.* Интеллектуальные процедуры синтеза топологии СБИС. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 108 с.
3. *Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar.* Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.
4. *Малышев Н.Г., Берштейн Л.С., Боженик А.В.* Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
5. *Dasgupta D., Forrest S.* Novelty Detection in Time Series Data using Ideas from Immunology. Fifth International Conference on Intelligent Systems. Reno, Nevada: June, 1996.
6. *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.
7. *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.
8. *Чернышев Ю.О., Венцов Н.Н., Мухтаров С.А.* Применение логик Лукасевича и Заде при реализации метода отрицательного отбора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 91-77.
9. *Венцов Н.Н.* Эволюционный подход к моделированию распределительных процессов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1886.
10. *Венцов Н.Н.* Разработка алгоритма управления процессом адаптации нечетких проектных метаданных // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/630.
11. *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.
12. *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.
13. *Берштейн Л.С., Боженик А.В.* Анализ использования оператора импликации в нечетком правиле вывода по аналогии // Известия ТРТУ. – 2004. – № 3 (38). – С. 5-10.
14. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. *Д.А. Поспелова.* – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986. – 321 с.
15. *Борисов А.Н., Алексеев А.В., Крумберг О.А.* и др. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. – Рига: Зинатне, 1982. – 256 с.
16. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
17. 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. – 386 с.
18. *Курейчик В.М.* Особенности построения систем поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 92-98.
19. Искусственные иммунные системы и их применение / Под ред. Дасгупты Д.: Пер. с англ. / Под ред. *Романюхи А.А.* – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.
20. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц.– М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

21. Zade L.A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338.
22. Курейчук В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с.

REFERENCES

1. Litvinenko V.A. Adaptivnye algoritmy proektnykh operatsiy SAPR EVA [Adaptive algorithms project operation AVA CAD], *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 intelligent systems and informarmation technology, p. Divnomorskoe, 2-9 Sept.]. Moscow: Fizmatlit, 2014, Vol. 1, pp. 113-119.
2. Lebedev B.K. Intellektual'nye protsedury sinteza topologii SBIS [Intellectual procedure of synthesis of VLSI topology]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2003, 108 p.
3. Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar. Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.
4. Malyshev N.G., Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Nechetkie modeli dlya ekspertnykh sistem v SAPR [A fuzzy model for expert systems in CAD]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 136 p.
5. Dasgupta D., Forrest S. Novelty Detection in Time Series Data using Ideas from Immunology. Fifth International Conference on Intelligent Systems. Reno, Nevada: June, 1996.
6. 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.
7. Ostroukh E.N., Zolotareva L.I., Bychkov A.A., Dolgov V.V. Vektornaya optimizatsiya pererabatyvayushchikh protsessov s uchetom syr'evogo defitsita [Vector optimization of refining processes subject to commodity shortages], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2011, No. 12-1, pp. 224-227.
8. Chernyshev Yu.O., Ventsov N.N., Mukhtarov S.A. Primenenie logik Lukasevicha i Zade pri realizatsii metoda otritsatel'nogo otbora [Application logics lukasiewicz and Zadeh in the method of adverse selection], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 91-77.
9. Ventsov N.N. Evolyutsionnyy podkhod k modelirovaniyu raspredelitel'nykh pro-tsessov [An evolutionary approach to modeling the distribution processes], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2013, No. 4. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1886.
10. Ventsov N.N. Razrabotka algoritma upravleniya protsessom adaptatsii nechetkikh proektnykh metadannykh [Development of an algorithm for management of process of adaptation of fuzzy project metadata], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, No. 1. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/630.
11. 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.
12. Chernyshev Yu.O., Ventsov N.N., Mukhtarov S.A. Razrabotka algoritma intellektual'noy podderzhki uluchsheniya promezhutochnykh resheniy optimizatsionnykh zadach [Algorithm development intellectual support improvement of intermediate solutions of optimization problems], *Vestnik DGTU* [Vestnik DSTU], 2012, No. 5 (56), pp. 68-76, pp. 63-69.
13. Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Analiz ispol'zovaniya operatora implikatsii v nechetkom pravile vyvoda po analogii [An analysis of the use of the implication operator in fuzzy rule inference by analogy], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2004, No. 3 (38), pp. 5-10.
14. Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta [Fuzzy sets in models of control and artificial intelligence], Under ed. D.A. Pospelova. Moscow: Nauka. Gl. red. Fiz.-mat. lit., 1986, 321 p.
15. Borisov A.N., Alekseev A.V., Krumberg O.A. i dr. Modeli prinyatiya resheniy na osnove lingvisticheskoy peremennoy [Models of decision making based on linguistic variable]. Riga: Zinatne, 1982, 256 p.
16. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning]. Moscow: Mir, 1976, 165 p.

17. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]: Translation from Japanese K. Asai, D. Vatada, S. Ivai i dr., Under ed. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno. Moscow: Mir, 1993, 386 p.
18. 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.
19. Iskusstvennye immunnnye sistemy i ikh primenenie [Artificial immune systems and their applications], Under ed. Dasgupty D., Translation from English, Under ed. Romanyukhi A.A. Moscow: Fizmatlit, 2006, 344 p.
20. Kofman A. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv [Introduction to the theory of fuzzy sets], Translation from English. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 432 p.
21. Zade L.A. Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, Vol. 8, pp. 338.
22. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika [Search adaptation: theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 272 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. О.Г. Солопова.

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.

Панасенко Павел Александрович – Филиал военной академии связи (г. Краснодар); e-mail: we_panasenko_777@mail.ru; 350035, г. Краснодар, ул. Красина, 4; адъюнкт.

Chernyshev Yury Olegovich – Don State Technical University; e-mail: myvnn@list.ru; 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: 88632738582; the department of automation of productions; professor.

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

Panasenko Pavel Alexandrovich – Branch of the Military Academy of Telecommunications (Krasnodar); e-mail: we_panasenko_777@mail.ru; 4, Krasina, Krasnodar, 350035, Russia; adjunct.

УДК 681.325

Б.К. Лебедев, В.Б. Лебедев, О.Б. Лебедев

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ МЕТОДАМИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА *

Рассматриваются новые принципы решения задачи множественной нелинейной символьной регрессии на основе идей генетического программирования. Решение представляется в виде трех хромосом. Предлагаются способы представления деревьев с произвольной локальной степенью вершин в виде линейной записи. Разработаны структуры и принципы кодирования и декодирования хромосом, несущих информацию о структуре дерева и имеющих гомологичные структуры. Структуру бинарного дерева можно задать, используя на базе алфавита $A = \{0, \bullet\}$ польское выражение. Определены основные свойства польского выражения, выполнение которых необходимо, чтобы ему соответствовало бинарное дерево. Предложен линейный алгоритм восстановления дерева по польскому выражению. Рассмотрены структура и принципы кодирования и декодирования хромосомы, для представления польского выражения. Разработана структура и принципы формирования линейной записи для иерархического дерева без ограничений на локальную степень внутренних вершин. На основе анализа определены свойства таких записей. Структура и

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы развития научного потенциала высшей школы РНП.2.1.2.1652 и грантов РФФИ № 12-01-00100, № 10-07-00055.