

В роботі представлено метод маршрутизації, що базується на багатокритеріальній оптимізації та апараті нечіткої логіки. Розроблено програмний комплекс для дослідження запропонованого методу

Ключові слова: оптимізація, маршрутизація, нечітка логіка

В работе представлен метод маршрутизации, который базируется на многокритериальной оптимизации и аппарате нечеткой логики. Разработан программный комплекс для исследования предложенного метода

Ключевые слова: оптимизация, маршрутизация, нечеткая логика

In work there is presented a routing method based on multicriteria optimization and fuzzy logic apparatus. The program complex was developed for proposed method investigation

Keywords: optimization, routing, fuzzy logic

МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

О. М. Буханько

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра мереж зв'язку

Харківський національний університет

радіоелектроніки

пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166

Контактний тел.: 096-280-72-87

E-mail: a_borman@mail.ru

1. Вступ

Однією з основних задач маршрутизації є вибір раціонального маршруту з множини ймовірних, ґрунтуючись на сукупності показників якості кожного з маршрутів.

Порівняння всіх значущих критеріїв для вибору оптимального рішення з множини варіантів є досить складним завданням. Це пов'язано зі складними залежностями між даними критеріями і складністю побудови математичної моделі мережі.

Актуальні на сьогодні протоколи маршрутизації [1 – 2] при оцінці потенційних маршрутів найчастіше керуються лише одним критерієм або, у кращому випадку, певною загальною метрикою, значення якої знаходиться на основі функції від декількох параметрів стану вузлів і каналів зв'язку з ваговими коефіцієнтами, що задаються апіорі. Це робить такі протоколи відносно неприйнятними для мереж з топологією, що постійно змінюється, та для мульти-сервісних мереж, де функція розрахунку загальної метрики та значення вагових коефіцієнтів повинні змінюватися в залежності від типу сервісу. Також найбільш поширені на сьогодні протоколи і методи маршрутизації не враховують стан завантаженості мережних ресурсів (значення миттєвої пропускної спроможності, значення вільного розміру буфера маршрутизатора тощо), що призводить до нерівномірного розподілу трафіку між альтернативними маршрутами і, як наслідок, перенавантажень. Вирішення перелічених вище проблем є актуальною задачею багатошляхової маршрутизації.

Метою даної статті є розробка методу маршрутизації на основі апаратів багатокритеріальної оптимізації та нечіткої логіки, що при виборі раціональних маршрутів рівноправно враховує усі значущі критерії та поточне завантаження мережних ресурсів.

Однією з задач дослідження є розробка програмного комплексу для реалізації запропонованого методу багатошляхової маршрутизації на основі знаходження підмножини непорівняльних за критерієм Парето маршрутів та її подальшого звуження за допомогою апарату нечітких продукцій.

2. Формування множини оптимальних маршрутів з урахуванням сукупності показників якості

Визначення маршруту являє собою одну з основних задач маршрутизації. Визначення маршруту є складною задачею, особливо, коли конфігурація мережі є такою, що між парою взаємодіючих мережних інтерфейсів існує множина маршрутів. Найчастіше вибір зупиняють на одному оптимальному по деякому критерію маршруті (на практиці, для зниження обсягу обчислень, обмежуються пошуком не оптимального в математичному сенсі, а раціонального, тобто близького до оптимального, маршруту). В якості критеріїв оптимальності можуть виступати, наприклад, номінальна пропускна спроможність і завантаженість каналів зв'язку, затримки, внесені каналами, кількість проміжних транзитних вузлів, надійність каналів і транзитних вузлів тощо. Але навіть у тому випадку, коли між кінцевими вузлами існує тільки один шлях, для складної топології мережі його знаходження може являти собою нетривіальну задачу. Маршрут може визначатися емпірично адміністратором мережі на підставі різних не формалізованих міркувань. Однак емпіричний підхід до визначення маршрутів мало придатний для великої мережі зі складною топологією. У цьому випадку використовуються автоматичні методи визначення маршрутів. Для цього кінцеві вузли та інші пристрої мережі оснащуються спеціальними програмними за-

собами, які організують взаємний обмін службовими повідомленнями, що дозволяє кожному вузлу скласти своє «уявлення» про мережу. Основуючись на зібраних даних, за допомогою програмних методів визначаються раціональні маршрути.

Багатокритеріальний аналіз [3, 4] має ряд переваг перед однопараметричною оптимізацією, але цей підхід практично не використовується в задачах телекомунікацій.

На сьогоднішній день, з появою все більшої кількості сервісів (послуг), число критеріїв, які повинні враховуватися при розв'язанні завдань у сучасних телекомунікаційних мережах, збільшується, що викликає необхідність застосування багатокритеріального аналізу.

Для розв'язання задачі одношляхової та багатошляхової маршрутизації можна використати відношення Парето [5, 6]. Аксиома Парето накладає певні вимоги на характер відношення переваги в багатокритеріальних задачах. А саме, бажано за кожним критерієм отримати, при можливості, найкраще значення.

Однак на практиці цей випадок зустрічається дуже рідко. Варто зазначити, що показники якості цільові функції [6] можуть бути трьох типів: нейтральними, узгодженими і конкурентними між собою. В третьому випадку досягти потенційного значення кожного з показників окремо не уявляється можливим. При цьому може бути досягнутий лише узгоджений оптимум введених цільових функцій – оптимум за критерієм Парето.

Оптимальності за критерієм Парето в критеріальному просторі відповідає підмножина Парето-оптимальних оцінок, що відповідають невідомуючим варіантам:

$$P(Y) = \text{opt}_2 Y = \{ \bar{k}(\varphi^0) \in Y : \exists \bar{k}(\varphi) \in Y : \bar{k}(\varphi) \geq \bar{k}(\varphi^0) \}, \quad (1)$$

де $\bar{k}(\varphi)$ – показники якості маршруту.

Розглянута у даній роботі модель телекомунікаційної мережі (ТКМ) складається з 10-ти маршрутизаторів (вузлів) R_1, R_2, \dots, R_{10} та каналів $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_{21}$, що з'єднують дані маршрутизатори між собою. Кожен канал характеризується вектором метрик:

$$\bar{u}_i = (d_i, \mu_i, c_i, P_i, B_i),$$

де d_i – затримка i -го каналу, мс; μ_i – пропускна спроможність i -го каналу, Мбіт/с; c_i – відносна вартість i -го каналу; P_i – ймовірність пакетної помилки; B_i – миттєва пропускна спроможність каналу, Мбіт/с.

Метрики маршрутів розраховуються на основі значень метрик каналів, що входять у склад даних маршрутів.

Якщо для деякої пари маршрутів із множини всіх маршрутів виконується нерівність $\bar{k}(\varphi') \geq \bar{k}(\varphi'')$, то вважається, що перший маршрут переважніше другого. Це означає, що другий маршрут ні при яких обставинах не може бути оптимальним та його можна виключити із подальшого процесу прийняття рішень згідно (1).

Програма, що реалізує пошук Парето-оптимальних маршрутів, була розроблена на мові програму-

вання C++ у середовищі розробки Embarcadero C++ Builder 2010 з наступними можливостями:

- знаходження множини усіх можливих маршрутів, що не мають петель, від одного вузла до іншого, по матрицям суміжності мереж, що містять від 3-х до 20-ти маршрутизаторів (вузлів);
- знаходження метрик маршрутів за значеннями метрик каналів, що входять у склад даних маршрутів;
- знаходження підмножини Парето-оптимальних маршрутів з множини усіх можливих маршрутів, що не мають петель, від одного вузла до іншого.

На рис. 1 зображена блок-схема алгоритму пошуку Парето-оптимальних маршрутів.

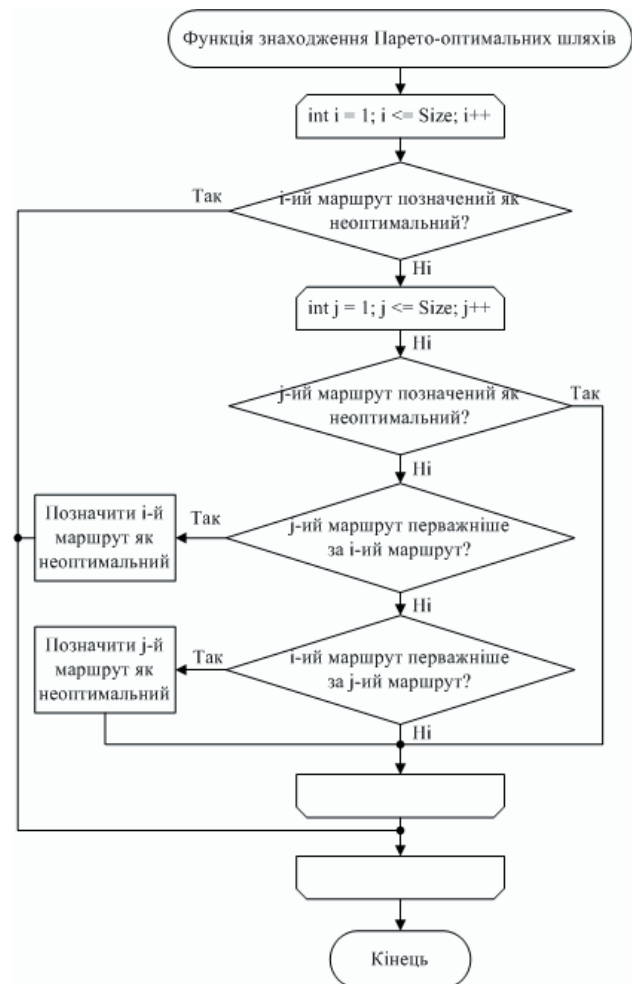


Рис. 1. Алгоритм програми пошуку множини Парето-оптимальних маршрутів

Даний алгоритм ґрунтується на рекурсивній функції, аргументами якої є вказівники на вузли, між якими шукаються маршрути, та на мережу, до якої належать дані вузли. Якщо перевірку умови рівності вказівників вузла-джерела і вузла призначення замінити на перевірку рівності кожному з вузлів, та, базуючись на цій інформації, здійснювати селекцію маршрутів, то за один виклик функції можна знайти всі шляхи від вузла-джерела до всіх інших вузлів.

Інтерфейс розробленої програми представлено на рис. 2.

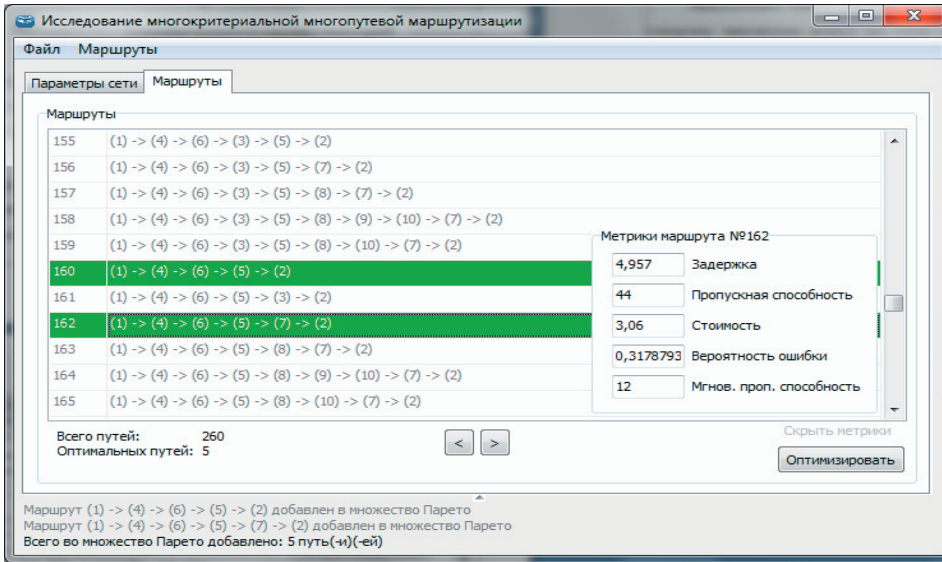


Рис. 2. Програма Парето-оптимізації

Приклад множини Парето-оптимальних маршрутів від вузла 1 до вузла 2 (рис. 3), який було отримано у ході дослідження за допомогою розробленої програми, наведений у табл. 1.

Таблиця 1

Маршрут	d_{route} , мс	μ_{route} , Мбіт/с	c_{route}	P_{route}	V_{route} , Мбіт/с
1-2	2,314	37	0,22	0,11	8
1-3-5-2	3,902	42	1,93	0,2295	10
1-3-5-7-2	3,962	42	2,5	0,2549	14
1-4-6-5-2	4,897	45	2,49	0,2946	10
1-4-6-5-7-2	4,957	44	3,06	0,3149	12

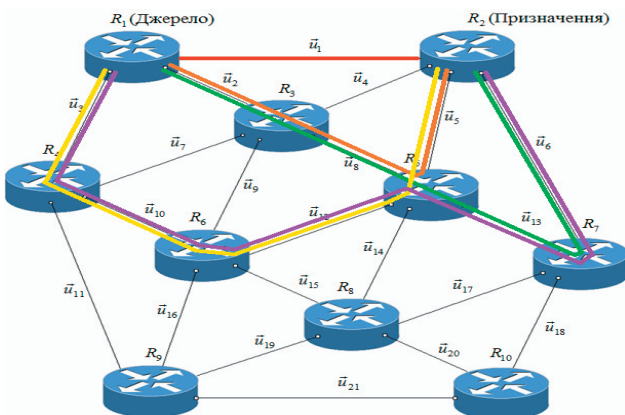


Рис. 3. Парето-оптимальні маршрути

3. Звуження множини Парето-оптимальних маршрутів на основі правил нечітких продукцій

Для подальшого знаходження раціонального маршруту (маршрутів) у даній роботі запропоновано застосувати метод звуження множини Парето-оптимальних маршрутів на основі систем правил нечітких продукцій.

Нечітка логіка [7, 8] в сукупності з іншими математичними засобами дозволяє будувати адекватні аналітичні та імітаційні лінгвістичні моделі засобів управління ресурсами, що базуються на систе-

стемах нечіткого виводу, які можна використовувати в перспективних протоколах маршрутизації.

У даному випадку нечітка логіка використовується як основа правил нечіткого виводу для звуження Парето-множини.

Як було показано вище, для формування Парето-множини непереважних маршрутів використовувалися показники якості каналів розглянутої моделі ТКМ в їх чіткому поданні. У якості нечітких лінгвістичних змінних (НЛЗ) для реалізації бази нечітких правил використовується фазифікація показників якості буферів вузлів, що входять у маршрути отриманої Парето-множини. Розглянемо детальніше дані показники якості.

Миттєва пропускна здатність каналу. Формально представимо «миттєву пропускну здатність» як вхідну лінгвістичну змінну β_1 . У якості терм-множини даної змінної розглянемо $T_1 = \{\text{«мала»}, \text{«невелика»}, \text{«середня»}, \text{«вище середньої»}, \text{«велика»}\}$. Функції приналежності для даної множини представлені на рис. 4.

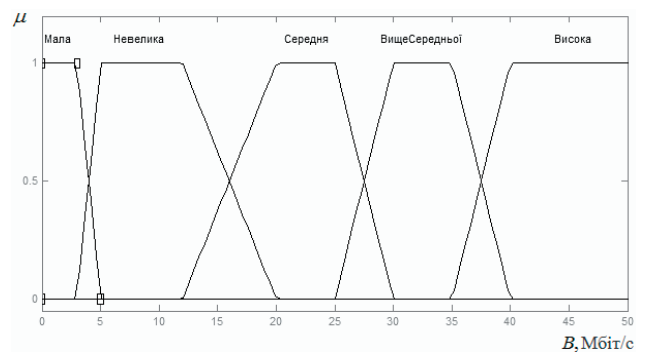


Рис. 4. Функції приналежності для β_1

Вільний об'єм буфера. У якості терм-множини даної змінної β_2 розглянемо $T_2 = \{\text{«малий»}, \text{«невеликий»}, \text{«середній»}, \text{«більше середнього»}, \text{«великий»}\}$. Функції приналежності для даних термів представлені на рис. 5.

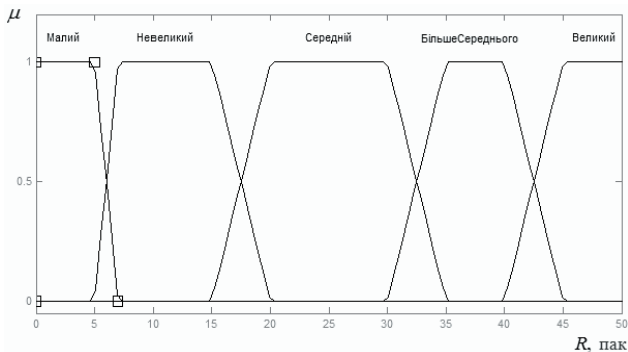


Рис. 5. Функції приналежності для β_2

Кожен маршрутизатор також характеризується алгоритмом обробки черги: FIFO, WRED, WRQ, який задається спочатку і більше не змінюється. Кожен з цих алгоритмів формує нечітке висловлювання для кожного маршрутизатора.

У табл. 2 наведені правила нечітких продукцій, що були розроблені на підставі перелічених вище особливостей.

Раціональними вважаються ті маршрути, у складі яких 80 або більше відсотків вузлів отримують значення вихідної змінної нечіткого виводу «Добре». У випадку, коли всі маршрути із множини Парето-оптимальних маршрутів мають менше 80-ти відсотків вузлів із значенням нечіткого виводу «Добре», раціональним вважається маршрут з найбільшим відсотком.

Для реалізації запропонованого методу звуження множини Парето-оптимальних маршрутів було застосовано редактор систем нечіткого виводу FIS із Fuzzy Logic Toolbox, що входить у склад пакету прикладних програм математичного моделювання Matlab R2011b. Редактор FIS є основним засобом, який використовується для створення або редагування систем нечіткого виводу в графічному режимі.

Таблиця 2

Миттєва пропускну спроможність	Вільний розмір буфера	Алгоритм обробки черги	Нечітка продукція
Мала	Малий	FIFO	Добре
Мала	Невеликий	FIFO	Добре
Мала	Середній	FIFO	Добре
Невелика	Малий	FIFO	Добре
Невелика	Невеликий	FIFO	Добре
Невелика	Середній	FIFO	Добре
Середня	Малий	WRED	Добре
Середня	Невеликий	WRED	Добре
Вище середньої	Малий	WRED	Добре
Вище середньої	Невеликий	WRED	Добре
Висока	Малий	WRED	Добре
Висока	Невеликий	WRED	Добре
Середня	Середній	WFQ	Добре
Середня	Більше середнього	WFQ	Добре
Середня	Великий	WFQ	Добре
Вище середньої	Середній	WFQ	Добре
Вище середньої	Більше середнього	WFQ	Добре
Вище середньої	Великий	WFQ	Добре
Висока	Середній	WFQ	Добре
Висока	Більше середнього	WFQ	Добре
Висока	Великий	WFQ	Добре

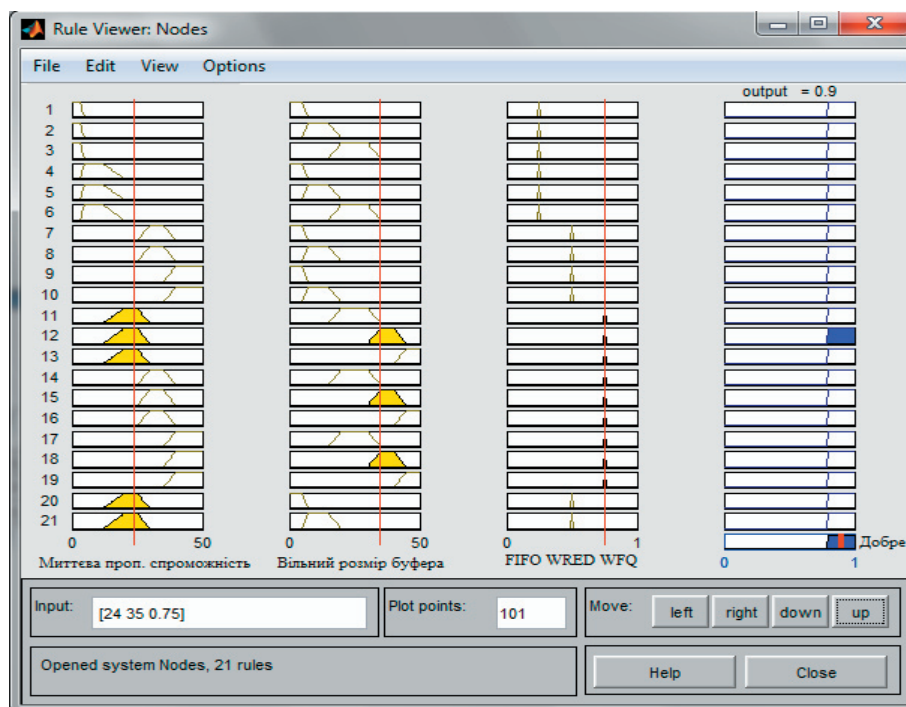


Рис. 6. Реалізація правил нечітких продукцій

Редактор FIS дозволяє викликати всі інші редактори і програми перегляду систем нечіткого виводу.

Для реалізації нечітких продукцій використовується алгоритм Мамдані з приведенням до чіткості центроїдним методом [9]. Отримання результатів вихідної змінної, в залежності від значень входних змінних, здійснюється за допомогою підпрограми перегляду правил нечіткого виводу (рис. 6).

Знаходження раціональних маршрутів від першого вузла досліджуваної у даній роботі мережі здійснюється за рахунок звуження множини Парето-оптимальних маршрутів між цими парами вузлів за допомогою розробленої системи нечітких продукцій.

Раціональні маршрути від першого до другого вузла, які

було отримано з множини Парето-оптимальних маршрутів (табл. 1), представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Маршрут	Процент вузлів із значенням змінної нечіткого висновку «Добре»	Раціональність маршруту
1-2	100	+
1-3-5-2	33,3	
1-3-5-7-2	50	
1-4-6-5-2	75	
1-4-6-5-7-2	80	+

Висновки

В даній роботі розроблено метод рішення задачі маршрутизації в ТКМ, заснований на апа-

ратах багатокритеріальної оптимізації і нечіткої логіки.

Особливостями даного методу, у порівнянні з актуальними на сьогодні алгоритмами маршрутизації, є, по-перше, відмова від надання метрикам апріорних вагових коефіцієнтів важливості для знаходження раціонального маршруту, що надає можливість відкласти (або взагалі позбутися) вирішення про важливість того чи іншого параметра ТКМ; по-друге, прийняття до уваги завантаженості полоси пропускання каналів й буферів маршрутизаторів мережі, що повинно дозволити більш рівномірно розподілити навантаження між альтернативними маршрутами та забезпечити більш гнучку адаптацію до динамічних змін параметрів мережі.

В залежності від параметрів звуження підмножини Парето-оптимальних маршрутів, даний метод може визначати декілька альтернативних маршрутів. У цьому випадку остаточний вибір може бути зроблений шляхом оцінки важливості метрик, в залежності від типу сервісу трафіку або запрошених потреб прикладної програми.

Література

1. Олифер, В.Г., Олифер, Н.А. Основы компьютерных сетей [Текст] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: «Питер». – 2009. – 352 с.
2. Лемешко, О.В., Симоненко, Д.В., Дробот, О.А. Результаты порівняльного аналізу потокових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах [Текст] / О.В. Лемешко, Д.В. Симоненко, О.А. Дробот // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків. – 2007. – №1(130). – С. 66 – 69.
3. Березовский, Б.А., Барышников, Ю.М., Борзенко, В.И., Кепнер, Л.М. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты [Текст] / Б.А. Березовский, Ю.М. Барышников, В.И. Борзенко, Л.М. Кепнер. – М.: Наука. – 1986 – 186 с.
4. Безрук, В.М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку [Текст] / В.М. Безрук. – Харків: ХНУРЕ. – 2002. – 156 с.
5. Безрук, В.М., Варич, В.В. Многокритериальный подход к маршрутизации в сетях связи [Текст] / В.М. Безрук, В.В. Варич // Радиотехника. – Харьков, 2010. – Вып. 163. – С. 45 – 48.
6. Bezruk, V.M. Methods of Multi-criterion Information-System Optimization [Текст] / V.M. Bezruk // Telecommunications and Radio Engineering. – USA, 2001. – 55(8). – P. 52 – 60.
7. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств [Текст] / А. Кофман. – М.: Радио и связь. – 1982. – 432 с.
8. Яхьева, Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст] / Г.Э. Яхьева. – М.: БИНОМ. – Лаборатория знаний. – 2006. – 316 с.
9. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FazzTECH [Текст] / А.В. Леоненков. – СПб.: БВХ – Петербург, 2005. – 736 с.