

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 44 (1216) 2016

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2016

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – 184 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого наказом Міністерства освіти і науки України № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена у наукометричні бази Copernicus (Польща), Elibrary (РІНЦ), DOAJ (Швеція), Google Scholar і базу даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Координаційна рада:

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Є.І. СОКОЛ, чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф. (**голова**);

К.О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф.Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М.Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А.І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В.Г. ДАНО, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. ДМИТРІЄНКО, д-р техн. наук, проф.; Ю.І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;

П.О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В.Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;

С.І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В.І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

Г.В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.; О.К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

П.Г. ПЕРЕРВА, д-р техн. наук, проф.; В.О. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М.І. РИШЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В.Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: С.Ю. Леонов, д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії: А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Є.Г. Жиликов, д-р техн.

наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук,

проф.; О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.; В.І. Носков, д-р техн. наук, проф.;

А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.; Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф.

(Казахстан); О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.; А.Г. Трифонов, д-р техн. наук,

проф. (Белорусь); Ханлар Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан);

Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан); Ihor Zanevsky, PhD, prof.

(Polska).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 9 від 25.11.2016 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2016

**Розміщення Вісника НТУ "ХПІ"
серія "Інформатика та моделювання"**

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

1. Serial registries: ISSN, Ulrich's Periodical Directory (США).

2. Abstracting systems: Copernicus (Польща), eLibrary (Росія), CiteFactor, SIS (Scientific Indexing Services), Open Academic Journals Index (Росія), UIF (Universal Impact Factor), Directory of Research Journals Indexing (Індія).

3. Web-based search systems: Google Scholar, Academic Index.

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Росія), Bielefeld Academic Search Engine (Німеччина), Open Journal Systems (Україна), Національна бібліотека ім. Вернадського (Україна), Науково-технічна бібліотека НТУ "ХПІ" (Україна), Text Archive (Росія).

5. Journal databases: Directory of open access journals (Швеція), OCLC WorldCat (США), Research Bible (Японія), Genamics Journal Seek (США), SHERPA/ROMEO, Academic Database Assessment Tool.

6. University Libraries: **США:** Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library. **Великобританія:** Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPrime Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. **Канада:** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. **Австралія:** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. **Швеція:** IBRIS – Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. **Нідерланди:** Quality Open Access Market, University of Leiden. **Мексика:** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. **Інші країни:** Universia (Іспанія), Babord+ (Франція), SLU (Швеція), Serge EL (Чехія), BON (Португалія), AUT Library (Нова Зеландія), Polska Bibliografia Naukowa (Польща), Державна національна технічна бібліотека (Україна), Наукова бібліотека ім. Говорова (Росія, Санкт-Петербург), Universiteits bibliotheek Gent (Бельгія), E-Resources Subject Access (Китай).

Електронна адреса сайта Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" www.pit.net.ua

Математические методы и модели

Е.Г. БЕРДИЧЕВСКИЙ, канд. техн. наук, зав. каф., НовГУ
им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ЛОГИК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭСТЕТИКИ

Рассмотрена возможность моделировать важнейшие показатели технической эстетики на основе теории нечетких логик. Предлагаемая методика базируется на использовании теории лингвистических переменных и построении функций принадлежности. Методика позволяет учесть этапность дизайн-проектирования путем определения временного инварианта. Ил.: 3. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: моделирование, показатели технической эстетики, нечеткие логики, лингвистические переменные.

Постановка проблемы и анализ литературы. Во многих сферах проектной и творческой деятельности, таких как архитектура, промышленный дизайн, прикладное искусство, реклама и т.д. приходится оценивать такой важнейший комплексный показатель качества готовой продукции как эстетичность. Множество известных общих и частных показателей эстетичности носят описательный характер, не поддаются формализации и количественной оценке [1]. Когда сравнительная количественная оценка эстетичности вариантов проектно-творческой деятельности все же необходима, прибегают к услугам экспертов, чья оценочная работа дает весьма ненадежные результаты. Разброс оценок экспертов бывает настолько велик, что даже статические методы усреднения данных экспертизы приводят к малоценным результатам. Это обстоятельство подчеркивает значительную актуальность проблемы надежной количественной оценки комплексного показателя "эстетичность" продукции. Одним из возможных путей решения проблемы является привлечение аппарата теории нечетких логик и мягких чисел. Известно, что эта теория позволяет в ряде случаев принимать правильные решения в условиях неполной и нечеткой информации [2 – 14].

Первые попытки успешного применения нечетких логик для ситуаций многовариантной оценки слабоформализуемых качественных решений появились в 70-80 годах прошлого века в работах Л. Заде, Э. Мамлани, Беллмана и других [3 – 5, 8 – 10]. Первостепенной областью внедрения алгоритмов нечеткой логики являлись всевозможные системы управления базами данных, экспертные системы в экономике, социологические исследования [4]. Результаты использования методов

нечеткой логики для решения прикладных задач оказались весьма успешными. В последнее десятилетие область привлечения аппарата нечетких логик значительно расширилась [7, 11 – 14]. Однако для решения проблем технической эстетики методы теории нечетких логик не привлекались, что обусловлено, вероятно, новизной и сложностью задачи.

Цель статьи – рассмотреть возможность количественной оценки и моделирования методами теории нечетких множеств такого важнейшего комплексного показателя качества промышленной продукции как "эстетичность", зависящего как от оригинальности и выразительности художественно-дизайнерского решения, так и от технологического совершенства при изготовлении изделия.

Основные результаты. Для достижения сформулированной цели предложено использовать одно из важнейших понятий теории нечетких логик – понятие лингвистической переменной.

Лингвистическая переменная позволяет приближенно описывать явления, которые настолько сложны, что не поддаются описанию в общепринятых количественных терминах [3].

Лингвистическая переменная определяется пятью параметрами:

$$(x, T(x), U, G, M),$$

где: x – название переменной (например, красивый, яркий, пластичный, модный и др.); $T(x)$ – терм-множество имен-значений переменной x . Каждому из этих имен соответствует подмножество X , заданное на универсальном множестве U с базовой переменной u ; G – синтаксическое правило, порождающее имена X значений переменной x (например, очень красивый, некрасивый, весьма красивый, очень некрасивый и т.д.); M – семантическое правило, ставящее в соответствие каждому элементу терм-множества нечеткое подмножество X универсального множества U . Это правило позволяет строить так называемую функцию принадлежности нечетких подмножеств множества U с именами $T(x)$ [6, 9].

Понятия "эстетичность" или "эстетическая выразительность" являются классическими лингвистическими переменными, и их неопределенность может быть формализована аппаратом теории нечетких множеств.

Итак, обозначим P как лингвистическую переменную "эстетичность". Терм-множество $T(p)$ представим как объединение трех подмножеств: $T_1(A_1(t)); T_2(A_2(t)); T_3(A_3(t))$:

$$T(P) = T_1(A_1(t)) \cup T_2(A_2(t)) \cup T_3(A_3(t)),$$

где $T_1(A_1(t))$ – терм, объединяющий самые общие, концептуальные показатели эстетичности:

- стилевое соответствие;
- сюжетная определенность;
- эргономичность формы;
- оригинальность;
- информационная выразительность.

$T_2(A_2(t))$ – терм, объединяющий показатели, выполнение которых необходимо для реализации концептуальных идей:

- пластичность, гармоничность;
- масштабность, пропорциональность;
- тектоничность, соподчиненность элементов;
- декоративность;
- фактурность, колористичность;
- композиционная целостность.

$T_3(A_3(t))$ – терм, объединяющий показатели, связанные с качеством изготовления изделия:

- тщательность исполнения рельефа, контуров, орнамента;
- четкость исполнения шрифтов, переходов, сопряжений;
- качество отделки внешних поверхностей;
- сохраняемость декоративных элементов (покрытий, лакокрасочных слоев и др.).

Вышеперечисленные показатели эстетичности относятся к направлению "Промышленный дизайн". Для других ветвей дизайна набор показателей – лингвистических переменных – будет отличаться. Так, в [7] сформулированы показатели качества для мультимедийного дизайна, включающий совершенно другой набор характеристик.

Построим модель формирования эстетичности в общем виде. Модель характеризуется каким-то количеством параметров (в нашем примере 15). Поставим каждому параметру в соответствие некоторое нечетное число, имеющее функцию принадлежности треугольной формы. Значение этого числа пронумеруем по принадлежности множеству $[0, a]$. Эти числа моделируют высказывания следующего вида: "параметр приблизительно равен \bar{a} и однозначно находится в диапазоне $[0, a]$. В нашем случае \bar{a} совпадает с $\frac{a}{2}$ [8].

Такая формализация понятия "эстетичность" позволяет учесть не только содержательный аспект, но и этапность формирования

эстетических показателей, то есть выделить временной инвариант. Для количественной оценки инварианта формирования эстетичности все показатели разобьем на три группы (профиля) и каждому поставим в соответствие свою функцию принадлежности.

В первую группу (профиль *A*) включаем показатели, формируемые на стадии выработки концепции, проектной идеи и не зависящие от этапа реализации проекта. Таких показателей четыре (стилевое соответствие, сюжетная определенность, эргономичность формы, оригинальность).

Во вторую группу (профиль *B*) включаем показатели, которые должны обеспечиваться на различных (преимущественно ранних) стадиях проектирования. Таких показателей тоже четыре (пластичность, гармоничность; масштабность, пропорциональность; тектоничность, соподчиненность элементов; композиционная целостность).

В третью группу (профиль *C*) включены оставшиеся семь показателей, которые выявляются на окончательных стадиях изготовления изделия (или макета).

На рис. 1 показана функция принадлежности для показателей эстетичности, не зависящих от стадии реализации проекта (профиль *A*).

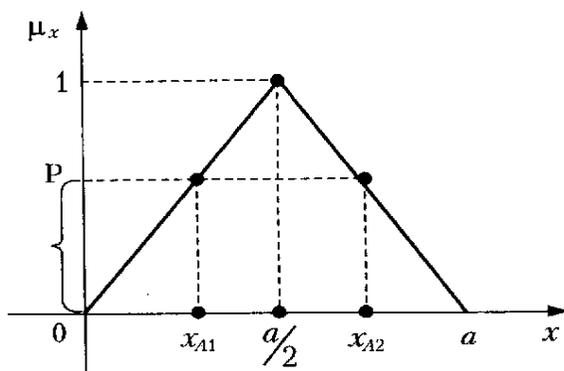


Рис. 1. Функция принадлежности показателей первой группы (профиль *A*)

На рис. 2 изображен профиль показателей эстетичности, формируемый на ранних этапах реализации дизайн-проекта. И на рис. 3 показан профиль показателей, формируемых на завершающих этапах проектирования и изготовления изделия. Величины Δu и Δv задают смещение наиболее вероятного значения показателя эстетичности относительно центра и определяют его вклад в показатель инварианта.

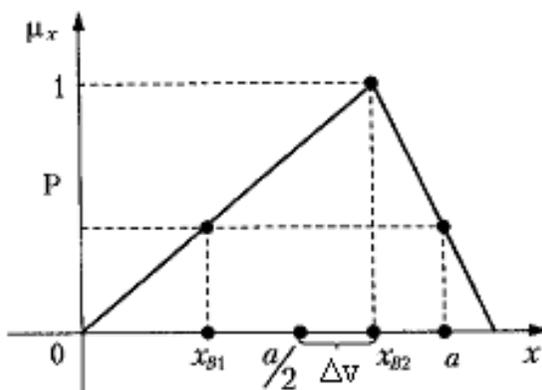


Рис. 2. Функция принадлежности показателей второй группы (профиль B)

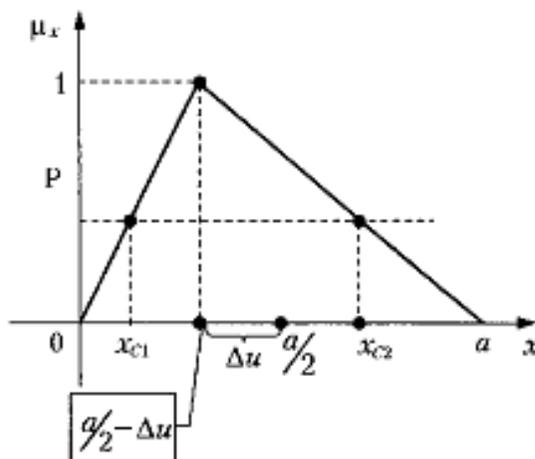


Рис. 3. Функция принадлежности показателей третьей группы (профиль C)

Зададимся произвольным уровнем функции принадлежности нечеткого показателя $M(x)=P$ и рассчитаем интервалы значений показателя, удовлетворяющих этому равенству. Такой интервал и будем считать инвариантом эстетичности I_P для каждого профиля в отдельности. В результате получим следующие интервальные переменные:

$$X_A = \left[\frac{ap}{2}; a - \frac{ap}{2} \right],$$

$$X_B = \left[\left(\frac{a}{2} + \Delta v \right) p; a - \frac{ap}{2} + \Delta v \right],$$

$$X_C = \left[\left(\frac{a}{2} - \Delta u \right) p; a - \frac{ap}{2} - \Delta u p \right],$$

где X_A, X_B, X_C – интервалы для соответствующих профилей A, B, C .

Пусть в модели эстетичности m показателей профиля A , k показателей профиля B , s показателей профиля C .

Согласно технологии выполнения алгебраических операций над нечеткими числами имеем интервал, задающий значение показателя инварианта эстетичности [10]

$$I_p = \frac{S \left(\frac{a}{2} - \Delta u \right) p + k \left(\frac{a}{2} + \Delta v \right) p + \frac{map}{2}}{k + m + s}.$$

Для того, чтобы представить этот интервал в виде треугольного нечеткого числа, необходимо найти значение показателя для $p = 1$

$$I_p = \frac{S \left(\frac{a}{2} - \Delta u \right) + k \left(\frac{a}{2} + \Delta v \right) + \frac{ma}{2}}{k + m + s}.$$

Для нашего примера $m = 4$; $k = 4$; $s = 7$. Нечетное число, выражающее для конкретной ситуации уровень эстетичности, определяется следующим выражением

$$I_p = \frac{7 \left(\frac{a}{2} - \Delta u \right) + 4 \left(\frac{a}{2} + \Delta v \right) + 2a}{15}.$$

Показатели Δu и Δv должны устанавливаться экспертным путем. Например, исследования в НовГУ показали, что при дизайн-проектировании и изготовлении ювелирных изделий $\Delta u = \Delta v = 0,3 \frac{a}{2}$.

Выводы. Теория нечетких логик (множеств) может эффективно использоваться для моделирования и нечеткой количественной оценки важнейших параметров дизайна и технической эстетики.

Список литературы: 1. Дизайн. История, современность, перспективы / Под ред. И.В. Голубятникова. – М.: Мир энциклопедий Аванта+; Астрель, 2011. – 224 с. 2. Коньшева Л.К. Основы теории нечетких множеств: Учебное пособие / Л.К. Коньшева, Д.М. Назаров. – СПб.: Питер, 2011. – 192 с. 3. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С. 172-215. 4. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский – М.: Радио и связь, 1981. – 286 с. 5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде – М.: Мир, 1976. – 302 с. 6. Zader L.A., Fuzzy sets // *Information and Control*. – 1995. – №. 8. – P. 338-353. 7. Бердичевский Е.Г. Эргономическое обеспечение мультимедийных технологий / Е.Г.Бердичевский // *Естественные и технические науки*. – 2012. – № 1. – С. 428-430. 8. Fukami S. Some considerations on fuzzy conditional inferences / S. Fukami, V. Vizumoto and K. Tanaka // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1980. – №. 4. – P. 243-273. 9. Negoita C.V. Applications of fuzzy sets to systems analysis / C.V. Negoita and P.A. Ralessev // Basel. Birkhavsver Verlag. – 1975. – 178 p. 10. Prade H. Using fuzzy set theory in scheduling problem: a case study / H. Prade // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1979. – Vol. 2. – № 2. – P. 153-165. 11. Вершинин М.И. Применение нечеткой логики в гуманитарных исследованиях / М.И. Вершинин, Л.П. Вершинина // *Библиосфера*. – 2007. – № 4. – С. 43-47. 12. Городецкий А.Е. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем / А.Е. Городецкий, И.Л. Тарасова. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2010. – 336 с. 13. Чеботарева Е.Э. Математические модели в гуманитарных и естественных науках: философская проблематизация / Е.Э. Чеботарева // *Мысль*. – 2014. – Вып. 17. – С. 73-81.

References:

1. Golubyatnikov, I.V. (2011), *Design. History, present, prospects*, World encyclopedias AVANTA+; Astrel, Moscow, 224 p.
2. Konyshova L.K., Nazarov D.M. (2011), *Fundamentals of the theory of fuzzy sets*, Peter, Saint-Petersburg, 192 p.
3. Bellman, R. (1976), "Decision-making in vague conditions", *Questions of the analysis and procedure of decision making*, World, Moscow, pp. 172-215.
4. Orlovski, S.A. (1981), *The problem of decision making with fuzzy initial information*, Radio and communication, Moscow, 286 p.
5. Zader, L. (1976), The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions, World, Moscow, 302 p.
6. Zader, L.A. (1995), "Fuzzy sets", *Information and Control*, No. 8, pp. 338-353.
7. Berdichevsky, E.G. (2012), "Ergonomic ensuring multimedia technologies", *Natural and technical science*, No. 1, pp. 428-430.
8. Fukami, S., Vizumoto, V. and Tanaka, K. (1980), "Some considerations on fuzzy conditional inferences", *Fuzzy Sets and Systems*, No. 4, pp. 243-273.
9. Negoita, C.V. and Ralessev, P.A. (1975), *Applications of fuzzy sets to systems analysis*, Basel, Birkhavsver Verlag, 178 p.
10. Prade, H. (1979), "Using fuzzy set theory in scheduling problem: a case study", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 2, No 2, pp. 153-165.
11. Vershinin, M.I., Vershinina, L.P. (2007), "The use of fuzzy logic in human studies", *Bibliosphere*, No. 4, pp. 43-47.
12. Gorodetsky, A.E., Tarasova, I.L., (2010), *Fuzzy mathematical modeling of poorly formalized processes and systems*, Peter, Saint-Petersburg, Publisher Polytechnic University, 336 p.

13. Chebotareva, E.E. (2014), *Mathematical models in the humanities and natural sciences: the philosophical problematization*, Think, Vol. 17, pp. 73-81.

Статью представил д-р економ. наук, проф. НовГУ имени Ярослава Мудрого Хузин З.М.

Поступила (received) 11.07.2016

Berdichevskiy Evsey, Cand. Sci. Tech. , Professor
Yaroslav-the-Wise Novgorod State University
B. Moscow, 56/12, q. 3, V. Novgorod, Russia, 173004
Tel: 8 911 6158244, e-mail: bersev@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001 9618-4374

УДК 004.827

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКИХ ЛОГІК ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕСТЕТИКИ / Бердичівський Е. Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 5 – 13.

Розглянуто можливість моделювати найважливіші показники технічної естетики на основі теорії нечітких логік. Запропонована методика базується на використанні теорії лінгвістичних змінних і побудові функцій належності. Методика дозволяє врахувати етапність дизайн-проекткування шляхом визначення тимчасового інваріанта. Ил.: 3. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: моделювання, показники технічної естетики, нечіткі логіки, лінгвістичні змінні.

УДК 004.827

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ЛОГИК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭСТЕТИКИ // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 5 – 13.

Рассмотрена возможность моделировать важнейшие показатели технической эстетики на основе теории нечетких логик. Предлагаемая методика базируется на использовании теории лингвистических переменных и построении функций принадлежности. Методика позволяет учесть этапность дизайн-проектирования путем определения временного инварианта. Ил.: 3. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: моделирование, показатели технической эстетики, нечеткие логики, лингвистические переменные.

UDK 004.827

APPLICATION OF FUZZY LOGICS FOR MODELLING OF INDICATORS OF THE INDUSTRIAL ART // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216). – P. 5 – 13.

The possibility to modeling the most important indicators of an industrial art on the basis of the theory of fuzzy logics is considered. The offered technique is based on use of the theory of linguistic variables and creation of functions of accessory. The technique allows to consider staging of design design by definition of a temporary invariant. Figs.: 3. Refs.: 13 titles.

Keywords: modeling, indicators of an industrial art, fuzzy logics, linguistic variables.

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Д.М. ГЛАВЧЕВ, асп., НТУ "ХПИ"

МЕТОД ПОИСКА ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, СВЯЗЫВАЮЩИХ ПЕРЕМЕННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ В ГТУ

Одной из причин ограниченной области применения геометрической теории управления, является нетривиальность определения преобразований, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей и требующих решения системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях. В статье предлагается осуществлять поиск функций преобразований с помощью разработанной нейронной сети. Проведенное моделирование показало работоспособность предлагаемого метода для случая, когда исходный нелинейный объект описывается системой уравнений, где правые части почти всех дифференциальных уравнений содержат не более двух одночленов. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления, системы дифференциальных уравнений в частных производных, функция преобразования, нейронная сеть.

Постановка проблемы. Геометрическая теория управления (ГТУ) является перспективным методом теории управления, поскольку позволяет отказаться от синтеза законов управления для нелинейных объектов и путём эквивалентных преобразований с помощью обратной связи в пространстве "вход-состояние" получать линеаризованные нелинейные системы [1 – 8]. Для полученных линейных систем можно применить хорошо разработанные методы теории управления линейными системами, получая структуры регуляторов или законы управления. После этого осуществляется обратный переход из пространства линейных систем в пространство исходной нелинейной системы. Однако широкого распространения ГТУ в настоящее время не получила по двум причинам: трудоемких аналитических вычислений, связанных с вычислением производных и скобок Ли, определением инволютивности распределений и т.д., а также из-за сложностей определения преобразований, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей и требующих решения системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств. Если первая причина ограниченности применения ГТУ может быть решена с помощью разработки специализированного программного обеспечения [5, 8 – 11], то вторая причина требует и разработки новых методов поиска решений указанных систем

дифференциальных уравнений в частных производных.

Анализ литературы [1 – 11] показывает, что линеаризация нелинейных систем с одним или большим числом управлений обратной связью по состоянию выполняется во многом аналогично, поэтому рассмотрим в начале проблемы линеаризации для нелинейной системы со скалярным управлением [3, 4, 6]

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + h(x)u, \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор состояний нелинейной системы; $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))^T$, $h(x) = (h_1(x), h_2(x), \dots, h_n(x))^T$, $f_i(0) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ – гладкие функции, причём начало координат при $u = 0$, является точкой равновесия; u – скалярное управление.

Метод линеаризации обратной связью по состоянию предполагает выполнение следующих шагов [3, 4, 6]:

Шаг 1. Для исходного нелинейного объекта управления определяется матрица управляемости

$$M_y = |h \quad ad_f h \quad \dots \quad ad_f^{n-1} h|, \quad (2)$$

где $ad_f h = [f, h] = L_f h - L_h f$ – скобки Ли векторных функций $f(x)$, $h(x)$; $L_f h = \frac{dh}{dx} f$ – производная Ли от векторной функции векторного аргумента $h(x)$ по функции $f(x)$; $ad_f^{n-1} h$ – производная Ли $(n-1)$ -го порядка от векторной функции $h(x)$ по функции $f(x)$.

Шаг 2. Формируется множество векторов $M_b = (h, ad_f h, \dots, ad_f^{n-3} h, ad_f^{n-2} h)$ из столбцов матрицы управляемости M_y (без $(n-1)$ -го столбца). Определяется $\det M_y$.

Шаг 3. Если множество векторов M_b инволютивно и $\det M_y \neq 0$, то существуют преобразования управления $u = b_1(x) + b_2(x)v$ и состояний $q = T_1(x)$, которые позволяют исходную нелинейную систему дифференциальных уравнений записать в форме Бруновского

$$\frac{dq_1}{dt} = q_2, \quad \frac{dq_2}{dt} = q_3, \quad \dots, \quad \frac{dq_{n-1}}{dt} = q_n, \quad \frac{dq_n}{dt} = v$$

и получить систему дифференциальных уравнений в частных производных для определения T_1

$$\nabla T_1 \mathbf{a} d_{\mathbf{f}}^i \mathbf{h} = 0, \quad i = \overline{0, n-2},$$

при ограничении $\nabla T_1 \mathbf{a} d_{\mathbf{f}}^{n-1} \mathbf{h} \neq 0$, где $\nabla T_1 = \frac{dT_1(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}}$.

Шаг 4. Определяются функции $T_2(\mathbf{x}) = \mathbf{L}_{\mathbf{f}} T_1(\mathbf{x})$, $T_3(\mathbf{x}) = \mathbf{L}_{\mathbf{f}}^2 T_1(\mathbf{x}), \dots$, $T_n(\mathbf{x}) = \mathbf{L}_{\mathbf{f}}^{n-1} T_1(\mathbf{x})$ и преобразование управления

$$u = \frac{1}{\mathbf{L}_{\mathbf{h}} \mathbf{L}_{\mathbf{f}}^{n-1} T_1} (-\mathbf{L}_{\mathbf{f}}^n T_1 + v).$$

Переход от переменных линейной модели в форме Бруновского к переменным нелинейной модели даже при скалярном управлении, является непростой задачей, которая в общем случае требует нетривиального решения системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств. При векторном управлении объектом, как правило, возрастает число уравнений в системе дифференциальных уравнений в частных производных и увеличивается число ограничений. Такие системы уравнений в общем случае для своего решения требуют трудоёмких алгоритмов либо применения эвристических подходов, либо сочетание того и другого. При этом, трудности определения функций преобразования существенно зависят от числа одночленов и их вида в правых частях дифференциальных уравнений исходной системы нелинейных уравнений. Однако, если правые части почти всех уравнений исходной системы содержит не более одного-двух одночленов, то может быть предложен метод, автоматизирующий процесс определения функций преобразования.

Целью статьи является разработка метода и нейронной сети, автоматизирующих процесс определения функций преобразований между переменными линейных и нелинейных моделей, когда исходный объект описывается системой дифференциальных уравнений, где правые части почти всех уравнений содержат один-два одночлена.

Вначале – на конкретном примере рассмотрим определение функций преобразования, когда математическая модель объекта управления (асинхронный тяговый привод дизель-поезда [12]) содержит шесть уравнений, одно из которых имеет три одночлена в своей правой части, а остальные – один или два одночлена.

Пример. Пусть объект управления описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4 = f_1; \\
 \frac{dx_2}{dt} &= a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = f_2; \\
 \frac{dx_3}{dt} &= a_{33}x_3 + u_1 = f_3 + u_1; \\
 \frac{dx_4}{dt} &= a_{44}x_4 + a_{46}x_6 = f_4; \\
 \frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_1 + a_{524} \frac{x_4}{x_2} = f_5; \\
 \frac{dx_6}{dt} &= u_2, f_6 = 0,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где x_i ($i = \overline{1, 6}$) – переменные объекта управления; f_1, f_2, \dots, f_6 – функции, описывающие правые части дифференциальных уравнений системы (1) без учета управлений u_1, u_2 ; $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{524}$ – постоянные коэффициенты.

С этой моделью объекта управления связаны векторные поля:

$$\begin{aligned}
 X &= |f_1, f_2, \dots, f_6|^T; \\
 Y_1 &= |0, 0, 1, 0, 0, 0|^T; \\
 Y_2 &= |0, 0, 0, 0, 0, 1|^T.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Для этой модели объекта управления распределения $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2\}$, $M^2 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2, L_X^2 Y_1, L_X^2 Y_2\}$ инволютивны, индексы управляемости k_1 и k_2 одинаковы: $k_1 = k_2 = 3$, а каноническая форма Бруновского имеет две клетки. Эквивалент исходной модели (1) в форме Бруновского имеет вид:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2; \quad \frac{dy_2}{dt} = y_3; \quad \frac{dy_3}{dt} = v_1; \quad \frac{dy_4}{dt} = y_5; \quad \frac{dy_5}{dt} = y_6; \quad \frac{dy_6}{dt} = v_2. \tag{5}$$

В этом случае существует некоторое преобразование $y_1 = T_1(\mathbf{x}) = T_1(x_1, x_2, \dots, x_6)$ и $y_4 = T_2(\mathbf{x}) = T_2(x_1, x_2, \dots, x_6)$, из которых можно определить y_2, y_3 и y_5, y_6 путем дифференцирования вдоль векторного поля $X_1 = X + u_1 Y_1 + u_2 Y_2$ функций $T_1(\mathbf{x})$ и $T_2(\mathbf{x})$:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 = L_{X_1} T_1(\mathbf{x}) = L_X T_1(\mathbf{x}) + u_1 L_{Y_1} T_1(\mathbf{x}) + u_2 L_{Y_2} T_1(\mathbf{x}); \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{dy_2}{dt} = y_3 &= L_{X_1}(L_X T_1(x)) = \\ &= L_X^2(T_1(x)) + u_1 L_{Y_1}(L_X T_1(x)) + u_2 L_{Y_2}(L_X T_1(x)); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy_3}{dt} = v_1 &= L_{X_1}(L_X^2 T_1(x)) = \\ &= L_X^3(T_1(x)) + u_1 L_{Y_1}(L_X^2 T_1(x)) + u_2 L_{Y_2}(L_X^2 T_1(x)); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{dy_4}{dt} = y_5 = L_{X_1} T_2(x) = L_X T_2(x) + u_1 L_{Y_1} T_2(x) + u_2 L_{Y_2} T_2(x); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy_5}{dt} = y_6 &= L_{X_1}(L_X T_2(x)) = \\ &= L_X^2(T_2(x)) + u_1 L_{Y_1}(L_X T_2(x)) + u_2 L_{Y_2}(L_X T_2(x)); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy_6}{dt} = v_2 &= L_{X_1}(L_X^2 T_2(x)) = \\ &= L_X^3(T_2(x)) + u_1 L_{Y_1}(L_X^2 T_2(x)) + u_2 L_{Y_2}(L_X^2 T_2(x)). \end{aligned} \quad (11)$$

Из соотношений (5) следует, что y_1 , y_2 , y_4 и y_5 не зависят от управлений, поэтому в соотношениях (6), (7), (9), (10) множители при управлениях u_1 и u_2 равны нулю:

$$L_{Y_1} T_1(x) = L_{Y_2} T_1(x) = L_{Y_1}(L_X T_1(x)) = L_{Y_2}(L_X T_1(x)) = 0; \quad (12)$$

$$L_{Y_1} T_2(x) = L_{Y_2} T_2(x) = L_{Y_1}(L_X T_2(x)) = L_{Y_2}(L_X T_2(x)) = 0. \quad (13)$$

При этом коэффициенты при управлениях в уравнениях (8), (11) не должны быть равны нулю:

$$L_{Y_1}(L_X^2 T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^2 Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (14)$$

$$L_{Y_2}(L_X^2 T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^2 Y_2 \right\rangle \neq 0; \quad (15)$$

$$L_{Y_1}(L_X^2 T_2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_X^2 Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (16)$$

$$L_{Y_2}(L_X^2 T_2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_X^2 Y_2 \right\rangle \neq 0. \quad (17)$$

С помощью соотношений (12) – (17) в компактной форме записано восемь дифференциальных уравнений в частных производных и четыре дифференциальных неравенства, с помощью которых определяются функции T_1 и T_2 . При малом значении максимального индекса управляемости ($k_{\max} = k_1 = k_2 = 3$), при одном, двух управлениях и небольшом числе дифференциальных уравнений ($n = 6$) в модели исходного объекта поиск функций $T_1(\mathbf{x})$, $T_2(\mathbf{x})$ может осуществлять человек.

В общем случае функции $T_1(\mathbf{x})$ и $T_2(\mathbf{x})$ могут зависеть от шести переменных: x_1, x_2, \dots, x_6 . С помощью соотношений (12), (13) можно уменьшить число переменных, от которых зависят функции $T_1(\mathbf{x})$, $T_2(\mathbf{x})$. Соотношения (12), (13) для функции $T_1(\mathbf{x})$ можно записать в виде:

$$L_{Y_1} T_1(\mathbf{x}) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{Y}_1 \right\rangle = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_i} \cdot y_{1i} = \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_3} \cdot 1 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_6} \cdot 0 = 0; \quad (18)$$

$$L_{Y_2} T_1(\mathbf{x}) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{Y}_2 \right\rangle = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_i} \cdot y_{2i} = \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_3} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_6} \cdot 1 = 0; \quad (19)$$

$$L_{Y_1} (L_X T_1(\mathbf{x})) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, L_X \mathbf{Y}_1 \right\rangle; \quad (20)$$

$$L_{Y_2} (L_X T_1(\mathbf{x})) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, L_X \mathbf{Y}_2 \right\rangle. \quad (21)$$

Из соотношений (18), (19) следует, что функция $T_1(\mathbf{x})$ не зависит от x_3 и x_6 . Для использования соотношений (20), (21) необходимо вычислить $L_X \mathbf{Y}_1$ и $L_X \mathbf{Y}_2$:

$$L_X \mathbf{Y}_1 = [\mathbf{X}, \mathbf{Y}_1] = \frac{\partial \mathbf{Y}_1}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{X} - \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Y}_1 = -\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Y}_1 =$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} + 2a_{12}x_1 & a_{124}x_4 & 0 & a_{124}x_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & a_{46} \\ a_{51} & -a_{524} \frac{x_4}{x_2^2} & 0 & a_{524} \frac{1}{x_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -a_{23} \\ -a_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (22)$$

$$L_X Y_2 = [X, Y_2] = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = |0, 0, 0, -a_{46}, 0, 0|^T. \quad (23)$$

Подставляя $L_X Y_1$ и $L_X Y_2$ соответственно в соотношения (20) и (21), получим:

$$L_{Y_1}(L_X T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1(x)}{\partial x}, L_X Y_1 \right\rangle = \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_2} \cdot (-a_{23}) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_3} \cdot (-a_{33}) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_6} \cdot 0 = 0; \quad (24)$$

$$L_{Y_2}(L_X T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1(x)}{\partial x}, L_X Y_2 \right\rangle = \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_3} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_4} \cdot (-a_{46}) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_6} \cdot 1 = 0. \quad (25)$$

Поскольку функция $T_1(x)$ не зависит от x_3 , то из соотношения (24) следует, что она не зависит и от переменной x_2 . Из соотношения (25) следует, что функция $T_1(x)$ не зависит и от переменной x_4 . Таким образом имеем, что функция T_1 является функцией двух переменных $T_1 = T_1(x_1, x_5)$. С помощью соотношений (13) аналогично можно получить, что функция T_2 также является функцией двух переменных $T_2 = T_2(x_1, x_5)$.

Функция $T_1(x_1, x_5)$ должна удовлетворять неравенствам (14) и (15).

Для получения конкретных неравенств необходимо вычислить $L_X^2 Y_1$ и $L_X^2 Y_2$:

$$L_X^2 Y_1 = [X, L_X Y_1] = \frac{\partial L_X Y_1}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} L_X Y_1 = -\frac{\partial X}{\partial x} L_X Y_1 =$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} + 2a_{12}x_1 & a_{124}x_4 & 0 & a_{124}x_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & a_{46} \\ a_{51} & -a_{524} \frac{x_4}{x_2^2} & 0 & \frac{a_{524}}{x_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ -a_{23} \\ -a_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{23}a_{124}x_4 \\ a_{22}a_{23} + a_{23}a_{33} \\ -a_{33}^2 \\ 0 \\ -a_{23}a_{524} \frac{x_4}{x_2^2} \\ 0 \end{vmatrix};$$

$$L_X^2 Y_2 = [X, L_X Y_2] = -\frac{\partial X}{\partial x} L_X Y_2 = \left[a_{46}a_{124}x_2, 0, 0, a_{44}a_{46}, \frac{a_{46}a_{524}}{x_2}, 0 \right]^T.$$

Подставляя $L_X^2 Y_1$ и $L_X^2 Y_2$ соответственно в соотношения (14) и (15), получим:

$$L_{Y_1}(L_X^2 T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^2 Y_1 \right\rangle = \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_1} \cdot (a_{23}a_{124}x_4) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_5} \cdot \left(-a_{23}a_{524} \frac{x_4}{x_2^2}\right) \neq 0; \quad (26)$$

$$L_{Y_2}(L_X^2 T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^2 Y_2 \right\rangle = \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_1} \cdot (a_{46}a_{124}x_2) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_5} \cdot \left(\frac{a_{46}a_{524}}{x_2}\right) \neq 0. \quad (27)$$

При $x_2 \neq 0$ и $x_4 \neq 0$ можно в качестве решения взять $T_1 = x_1$. В этом случае имеем:

$$a_{23}a_{124}x_4 \neq 0; \quad a_{46}a_{124}x_2 \neq 0.$$

Решение $T_1 = x_1$ не является единственным. Нетрудно проверить, что решением является также:

$$T_1 = c_1 x_1; \quad T_1 = c_2 x_5; \quad T_1 = c_3 x_1 + c_4 x_5; \quad T_1 = \frac{x_1}{x_4}; \quad T_1 = \frac{x_5}{x_4} x_2^2 \text{ и т.д.,}$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – некоторые вещественные константы. Таким образом, на последнем этапе определения функций преобразования должен подключаться эксперт.

Аналогичным образом из соотношений (16) и (17) определяются неравенства для функции $T_2(x_1, x_5)$:

$$\frac{\partial T_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} \cdot (a_{23}a_{124}x_4) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x})}{\partial x_5} \cdot (-a_{23}a_{524} \frac{x_4}{x_2}) \neq 0; \quad (28)$$

$$\frac{\partial T_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} \cdot (a_{46}a_{124}x_2) + \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_5} \cdot (\frac{a_{46}a_{524}}{x_2}) \neq 0. \quad (29)$$

При $x_2 \neq 0$ и $x_4 \neq 0$ можно в качестве решения взять $T_2 = x_5$. В результате получим:

$$-a_{23}a_{524} \frac{x_4}{x_2} \neq 0; \quad \frac{a_{46}a_{524}}{x_2} \neq 0.$$

И в этом случае решение не является единственным.

Из функций путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля X можно определить y_2, y_3, y_5, y_6 :

$$y_1 = T_1(\mathbf{x}) = x_1; \quad y_2 = \mathbf{L}_X T_1(\mathbf{x}) = a_{11}x_1 + a_{11}x_1^2 + a_{124}x_2x_4;$$

$$y_3 = \mathbf{L}_X(\mathbf{L}_X T_1(\mathbf{x})) = (a_{11} + 2a_{12}x_1)(a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4) + (a_{124}x_4(a_{22}x_2 + a_{23}x_3) + a_{124}x_2(a_{44}x_4 + a_{46}));$$

$$y_4 = T_2(\mathbf{x}) = x_5; \quad y_5 = \mathbf{L}_X T_2(\mathbf{x}) = a_{51}x_1 + a_{524} \frac{x_4}{x_2}; \quad (30)$$

$$y_6 = \mathbf{L}_X(\mathbf{L}_X T_2(\mathbf{x})) = a_{51}(a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4) + (-a_{524} \frac{x_4}{x_2})(a_{22}x_2 + a_{23}x_3) + \frac{a_{524}}{x_2}(a_{44}x_4 + a_{46}).$$

Анализ примера показывает, что функции преобразования $T_1(\mathbf{x}), T_2(\mathbf{x})$ определяются в два этапа. На первом этапе с помощью нулевых коэффициентов при управлениях u_1, u_2 в соотношениях (6), (7), (9), (10) определяют аргументы, от которых зависят функции $T_1(\mathbf{x}), T_2(\mathbf{x})$. На втором этапе с помощью дифференциальных неравенств (14) – (17) определяются конкретные значения функций $T_1(\mathbf{x}), T_2(\mathbf{x})$. Первый этап весьма трудоемок, а при увеличении числа уравнений и управлений в исходном объекте управления, а также увеличения максимального индекса управляемости в форме Бруновского, его трудоемкость существенно возрастает, однако, когда исходный объект описывается системой дифференциальных уравнений, в которых правые части почти всех уравнений содержат не более двух одночленов, его можно

относительно просто автоматизировать. Автоматизация второго этапа определения функций преобразований также необходима, поскольку увеличение числа уравнений и управлений в исходном объекте может существенно усложнить дифференциальные неравенства и увеличить их число, что затруднит эвристический поиск решения или применение известных методов.

Рассмотренный пример, а также опыт применения геометрической теории другими авторами показывает, что функции преобразования имеют простой вид, если правые части дифференциальных уравнений объекта управления содержат один-два одночлена полиномов, например:

$$\begin{aligned} T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) &= x_g, \quad x_g \in \mathbf{M} = \{x_k, x_l, \dots, x_p\}; \\ T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) &= x_g + x_{g1}, \quad x_g, x_{g1} \in \mathbf{M}; \end{aligned} \tag{31}$$

.....

$$T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) = x_g + x_{g1} + \dots + x_p, \quad x_g, x_{g1}, \dots, x_p \in \mathbf{M},$$

где $T_g(x_k, x_l, \dots, x_p)$ – функция преобразования для g -й клетки Бруновского, которой соответствуют переменные x_k, x_l, \dots, x_p объекта управления, не исключенные из числа аргументов функции на первом этапе ее определения.

Если автоматический перебор решений с помощью выражений (31) не позволяет получить функции преобразований, а правые части уравнений объекта управления и дифференциальные неравенства (14) – (17) содержат выражения, отличные от одночленов полиномов, то соотношения (31) должны быть скорректированы с учетом этой дополнительной информации.

Нейронная сеть для поиска функций преобразований. Поиск функций преобразований можно выполнить с помощью нейронной сети, однако такая сеть должна обеспечивать распознавание и хранение нескольких решений. Обобщенная архитектура такой нейронной сети приведена на рис. 1.

При этом архитектура нейронной сети для поиска функций преобразования будет иметь вид, приведённый на рис. 2.

На входные нейроны $S_1, \dots, S_i, \dots, S_n$ поступают единичные сигналы, моделирующие аргументы функции преобразования $T_1(\mathbf{x}) = T_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Если в процессе анализа функции $T(\mathbf{x})$ с помощью соотношений (12), (13), (14) – (17) удастся выяснить, что функция $T(\mathbf{x})$ не зависит от каких-то аргументов, например, l_1, l_2, \dots, l_r ,

то на входы нейронов $S_{l1}, S_{l2}, \dots, S_{lr}$ подаются отрицательные смещения $U_{cmS_{l1}} = U_{cmS_{l2}} = \dots = U_{cmS_{lr}} = -1$.

В результате на входах нейронов $S_{l1}, S_{l2}, \dots, S_{lr}$ будут нулевые входные сигналы: $U_{вхS_{l1}} = U_{вхS_{l2}} = \dots = U_{вхS_{lr}} = 0$, а на входах остальных нейронов – единичные входные сигналы. Поскольку $U_{выхS_k} = U_{вхS_k}, k = \overline{1, n}$, то на выходах нейронов S -слоя будут нулевые или единичные выходные сигналы.

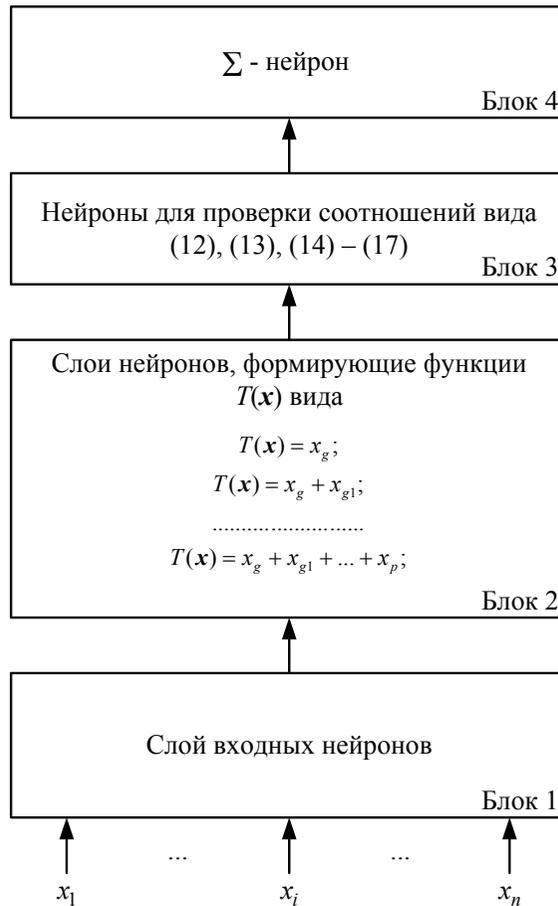


Рис. 1. Обобщенная архитектура нейронной сети для поиска функций преобразования

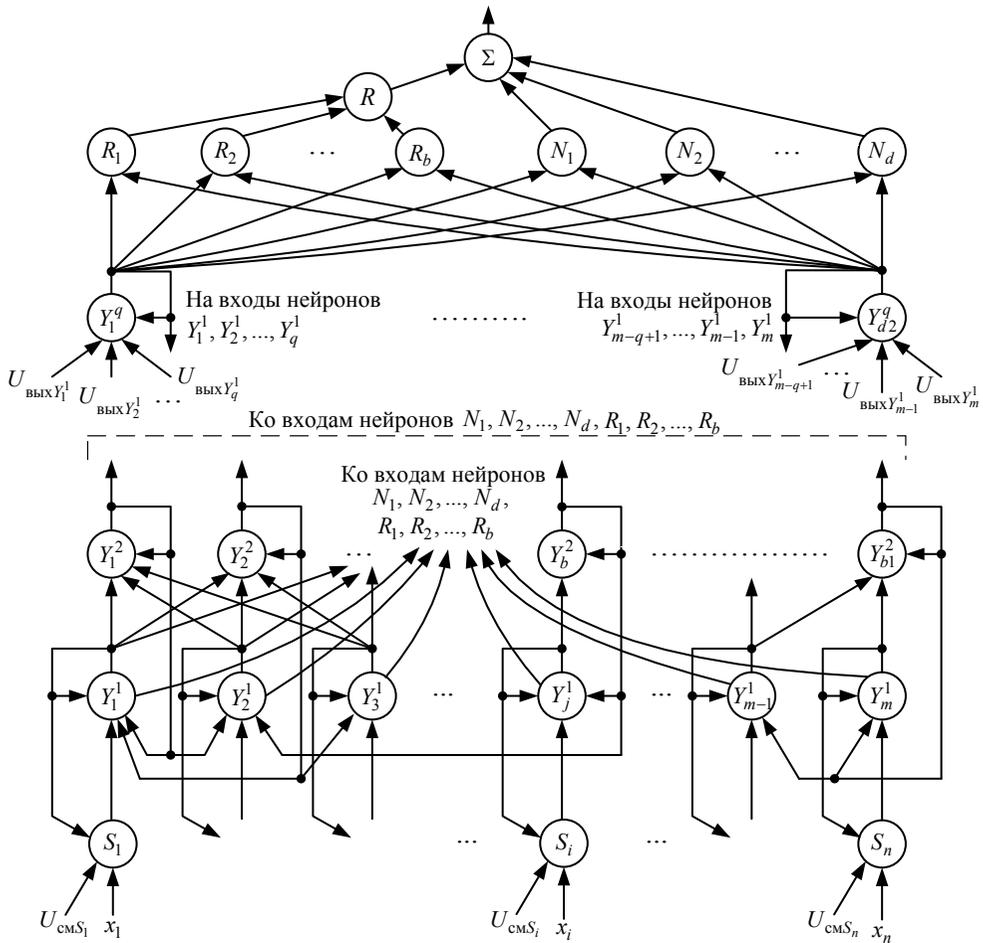


Рис. 2. Нейронной сети для поиска функций преобразований

Слой Y^1 -нейронов служит для запоминания решений вида $T(\mathbf{x}) = x_k, k \in \mathbf{M} = \{1, 2, \dots, n\}$. Он используется в случае, когда на вход нейронной сети подаются отдельные аргументы, от которых может зависеть функция $T(\mathbf{x})$. При подаче на вход S -слоя произвольного аргумента x_k , от которого может зависеть функция $T(\mathbf{x})$, он запоминается нейроном Y_k^1 , на выходе которого появляется единичный выходной сигнал, который поступает на вход элемента Y_k^1 слоя Y^1 -нейронов. Выходной сигнал нейрона Y_k^1 фиксирует свой выходной единичный сигнал по цепи обратной. Выходной сигнал нейрона Y_k^1

поступает на входы R - и N -нейронов, которые проверяют выполнение равенств (12), (13) и неравенств (14) – (17). С помощью R -нейронов проверяются все b равенств, задаваемых соотношениями вида (12), (13). Если все b равенств вида (12), (13) выполняются, то на входе R -нейрона все входные сигналы равны нулю: $U_{\text{вх}R_j} = 0, j = \overline{1, b}$. Поскольку R -нейрон имеет функцию активации вида

$$U_{\text{вых}R} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{вх}R} = 0, \\ 1, & \text{если } U_{\text{вх}R} \neq 0, \end{cases}$$

то при выполнении всех b соотношений (12), (13) на его выходе будет нулевой сигнал. При невыполнении хотя бы одного из соотношений (12), (13) на выходе R -нейрона будет единичный сигнал, который сбросит нейрон Σ в нулевое состояние, что будет указывать на то, что проверяемая функция преобразования $T(x_k) = x_k$ не является решением, и поиск подходящей функции нужно продолжать.

Поскольку N -нейроны имеют функцию активации вида

$$U_{\text{вых}N_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}N_i} \neq 0, i = \overline{1, d}, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}N_i} = 0, i = \overline{1, d}, \end{cases}$$

то при выполнении каждого из неравенств (14) – (17) (число неравенств равно числу управлений объектом) на входе Σ -нейрона появится в общем случае d единиц. Поскольку Σ -нейрон имеет функцию активации вида

$$U_{\text{вых}\Sigma} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma} = d, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma} < d, \end{cases}$$

то при выполнении каждого из d неравенств вида (14) – (17) и каждого из b равенств (12), (13) на выходе Σ -нейрона появится единичный выходной сигнал, указывающий на то, что функция преобразования найдена: $T(\mathbf{x}) = x_k$. При $U_{\text{вых}\Sigma} = 0$ выходной сигнал указывает на то, что функция $T(\mathbf{x})$ не найдена и необходимо продолжать поиск.

Таким образом, с помощью нейронной сети можно проверить все функции преобразования вида $T(\mathbf{x}) = x_k$, где функция $T(\mathbf{x})$ может определяться одним аргументом.

Слой Y^2 -нейронов служит для запоминания решений вида $T(\mathbf{x}) = x_k + x_{k1}$, $k, k1 \in M = \{1, 2, \dots, n\}$. В этом случае на вход нейронной сети подаются пары возможных аргументов функции $T(\mathbf{x})$, которые воспринимаются входными S -нейронами, а затем запоминаются

нейронами Y_k^1, Y_{k1}^1 Y^1 -слоя. Единичные выходные сигналы нейронов Y_k^1 и Y_{k1}^1 поступают на входы элемента Y^2 -слоя, единичный выходной сигнал которого соответствует возможной функции преобразования $x_k + x_{k1}$. Этот сигнал поступает на входы R - и N -нейронов, которые совместно с нейроном Σ определяют – является ли соотношение $T(\mathbf{x}) = x_k + x_{k1}$ функцией преобразования или нет. Аналогичным образом проверяются все функции преобразования, зависящие от двух аргументов.

Слой Y_1^q -нейронов служит для запоминания решений вида $T(\mathbf{x}) = x_k + x_{k1} + \dots + x_{kq}$ и его функционирование аналогично функционированию слоев Y^1 и Y^2 , которые были описаны выше.

Выводы: На основе анализа процесса определения функций преобразования в ГТУ между переменными линейных и нелинейных моделей, когда исходный объект описывается системой дифференциальных уравнений, где правые части почти всех уравнений содержат не более двух одночленов, функции преобразования, как правило, определяются соотношениями вида (31) и могут быть определены с помощью предложенной нейронной сети. Если решение таким образом определить не удаётся, то необходим поиск функций преобразования в более широком классе функций, чем функции, задаваемые соотношениями вида (31).

Таким образом, на основе нейронных сетей разработан подход к поиску функций преобразований, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей.

Список литературы: 1. *Ibragimov V.H.* Linearization of third-order ordinary differential equations by point and contact transformations / *N.H. Ibragimov, S.V. Meleshko* // *Math. Anal. Appl.* – 2005 – № 308. – P. 266-289. 2. *Краснощёченко В.Н.* Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / *В.И. Краснощёченко, А.П. Крищенко*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с. 3. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие / *Д.П. Ким*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с. 4. *Kim D.P.* Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System / *D.P. Kim*. – Seal: Harnol, 2000. – 558 p. 5. *Дмитриенко В.Д.* Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный*. – Х.: НТМТ, 2013. – 248 с. 6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. Т.5. Методы современной теории управления / Под ред. *К.А. Пупкова и Н.Д. Егунова*. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с. 7. *Marina R.* Nonlinear Control Design / *R. Marino, P. Tomei*, – Prentice Hall Europe, 1995. – 396 p. 8. *Дмитриенко В.Д.* Автоматизация символьных вычислений в процессе преобразования нелинейных моделей объектов к эквивалентным линейным / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный* // *Transaction of*

Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physycal-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems. – Baku, 2014. Vol. XXXIV. – № 6. – С. 130-139. **9.** Дмитриенко В.Д. Преобразование нелинейных систем управления к эквивалентным линейным в канонической форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – № 4 (25). – С. 8 – 14. **10.** Дмитриенко В.Д. Синтез оптимальных законов управления тяговым электроприводом методами дифференциальной геометрии и принципа максимума / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Харків: ХУПС, 2009. – Вип. 4 (78). – С. 42-51. **11.** Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заповловский, С.Ю. Леонов. – Х.: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с.

References:

1. Ibragimov, V.H. and Meleshko, S.V. (2005), "Linearization of third-order ordinary differential equations by point and contact transformations". Math. Anal. Appl., Vol. 308, pp. 266-289.
2. Krasnoshechenko, V.N. and Krishenko, A.P. (2005), *Nonlinear systems: geometrical method of analysis and synthesis*, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), 520 p.
3. Kim, D.P. (2004), *The theory of automatic control. T. 2 Multidimensional nonlinear, optimal and adaptive systems: tutorial*, Moscow, FIZMATLIT, 464 p.
4. Kim, D.P. (2000), *Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System*, Seal: Harnol, 558 p.
5. Dmitrienko, V.D. and Zakovorotny, A.Y. (2013), *Modelling and optimization of management processes of diesel trains*, Kharkov, HTMT, 248 p.
6. Pupkov, K.A. and Egunov, N.D. (2004), *Methods of classical and modern control theory: Textbook in 5 volumes. V.5. Methods of modern control theory*, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), 784 p.
7. Marina, R. and Tomei, P. (1995), *Nonlinear Control Design*, Prentice Hall Europe, 396 p.
8. Dmitrienko, V.D. and Zakovorotny, A.Y. (2014), "Automation of symbolic calculations in the process of conversion the nonlinear models of objects to the equivalent linear", *Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physycal-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problem.*, Baku, Vol. XXXIV, No 6, pp. 130-139.
9. Dmitrienko, V.D. and Zakovorotny, A.Y. (2014), "Converting the nonlinear control systems equivalent to the linear canonical Brunovsky form", *Electrical systems and complexes, Magnitogorsk: MSTU*, Vol. No 4 (25), pp. 8-14.
10. Dmitrienko, V.D. and Zakovorotny, A.Y. (2009), "Synthesis of optimal control laws of the traction electric drive methods of differential geometry and maximum principle", *Information processing systems. Collection of scientific papers, Kharkiv national university of Air Force, Kharkiv*, Vol. 4 (78), pp. 42-51.
11. Noskov, V.I., Dmitrienko, V.D., Zapolovsky, N.I. and Leonov, S.Yu. (2003), *Modelling and optimization of locomotive management and control systems*, KhPhI "Transport of Ukraine", Kharkiv, 248 p.

Статью представил д-р техн. наук, профессор НТУ "ХПИ" Серков А.А.

Поступила (received) 05.06.2016

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Zakovorotniy Alexandr, Cand. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: arcade@i.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Dmytro Hlavchev, master
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: +380993049807, e-mail: dmitriyglavchev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4248-4819

УДК 681.5.015.24

Метод пошуку функцій перетворення, що пов'язують змінні нелінійних та лінійних моделей в ГТК / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Главчев Д.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 14 – 30.

Однією з причин обмеженої області застосування геометричної теорії керування, є складність визначення перетворень, що пов'язують змінні лінійної і нелінійної моделей і потребують вирішення системи диференціальних рівнянь в частинних похідних при обмеженнях. У статті пропонується здійснювати пошук функцій перетворень за допомогою розробленої нейронної мережі. Проведене моделювання показало працездатність запропонованого методу для випадку, коли вихідний нелінійний об'єкт описується системою рівнянь, де праві частини майже всіх диференціальних рівнянь містять не більше двох одночленів. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: геометрична теорія керування, системи диференціальних рівнянь в частинних похідних, функція перетворення, нейронна мережа.

УДК 681.5.015.24

Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Главчев Д.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 14 – 30.

Одной из причин ограниченной области применения геометрической теории управления, является сложность определения преобразований, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей и требующих решения системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях. В статье предлагается осуществлять поиск функций преобразований с помощью разработанной нейронной сети. Проведенное моделирование показало работоспособность предлагаемого метода для случая, когда исходный нелинейный объект описывается системой уравнений, где правые части почти всех дифференциальных уравнений содержат не более двух одночленов. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления, системы дифференциальных уравнений в частных производных, функция преобразования, нейронная сеть.

UDC 681.5.015.24

Search method of conversion functions, linking the variables of linear and nonlinear models in the GCT / Dmitrienko V.D., Zakovorotniy A.Y., Hlavchев D.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (1216). – P. 14 – 30.

One reason for the limited scope of the geometric control theory, is a difficult definition of transformations relating the variables of linear and nonlinear models and solutions require a system of differential equations in partial derivatives with constraints. The paper proposes a search function multiplication with the help of the developed neural network. The simulation showed the efficiency of the proposed method for the case as non-linear as the initial object is described by a system of equations, where the right side of almost all differential equations contain no more than two monomials. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: geometric control theory, system of differential equations in partial derivatives, function multiplication, neural network.

УДК 62-50:621.783.22:66.096.5 DOI: 10.20998/2411-0558.2016.44.03

Д.Е. ИВАНОВ, д-р техн. наук, доц., с.н.с., ТУС ИПММ НАН
Украины, Славянск,

В.Н. ТКАЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, ТУС ИПММ
НАН Украины, Славянск

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРА ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗАДАНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Рассматривается задача идентификации параметра лучистого теплообмена в задаче теплопроводности в заданных граничных условиях. Предложен новый метод решения задачи, который основан на генетическом алгоритме. Идентифицируемый параметр аппроксимируется полиномом n -й степени, коэффициенты которого определяют особь в генетическом алгоритме. Выполнена программная реализация метода и проведены машинные эксперименты. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: идентификация параметра, лучистый теплообмен, задача теплопроводности, генетический алгоритм.

Постановка проблемы и анализ литературы. Математическое моделирование в настоящее время является эффективным инструментом исследования процессов различной природы, а также непременным этапом конструирования как автоматизированных, так и автоматических систем управления процессами. Сложность применения многих математических моделей связана с отсутствием необходимых данных (физических констант или зависимостей) для параметров уравнений, входящих в модель. Таким образом, возникает объективная необходимость постановки и решения задач идентификации параметров математических моделей. Под параметрической идентификацией понимается определение таких параметров модели объекта, которые бы делали её идентичной рассматриваемому объекту.

Высокие требования к точности моделей вынуждают рассматривать неизвестные величины параметров модели распределенными в пространстве либо во времени. Для построения более точных математических моделей теплофизических процессов необходимо некоторые параметры модели считать функциями теплофизических характеристик моделируемой среды, таких как температура, давление, скорость движения либо время. Наиболее известным и популярным методом решения задач идентификации распределенных систем, которые относятся к классу обратных некорректных задач, является метод регуляризации Тихонова [1]. Имеется ряд обобщающих монографий, излагающих опыт постановки задач различной сложности и

предлагаются более или менее эффективные методы их решения. При очень грубой классификации методов можно выделить методы регуляризации [1, 2], экстремальные методы, в том числе градиентные и итерационной регуляризации [3, 4], методы основанные на функциональной аппроксимации с последующим применением метода наименьших квадратов [5, 6].

Недостатком метода регуляризации является большой объем вычислений, связанный с громоздкой процедурой поиска нужного значения параметра регуляризации, а также с овражностью регуляризирующего функционала. Другой существенный недостаток метода связан с самой идеей регуляризации: сглаживание в пределах погрешности измерений. Чем больше погрешность, тем можно получить более гладкую кривую, но при этом возрастает опасность получения хотя и более плавной кривой, но все более отклоняющейся от истинной [1, 5].

Предлагаются методы, использующие идею МНК. Минимизация квадратичного функционала невязки уравнения третьего граничного условия, содержащего искомый параметр, повышает устойчивость к ошибкам во входных данных.

Предложенные методы идентификации представляют собой аппроксимацию функции параметра полиномом невысокой степени или сплайнами. Таким образом, задача сводится к нахождению неизвестных коэффициентов аппроксимирующих полиномов. Основная цель такой аппроксимации – получить устойчивое, достаточно точное представление функции искомого параметра, произведя небольшое количество вычислительных процедур по сравнению, например, с методом регуляризации.

Аппроксимация функции полиномом n -ой степени может быть проведена благодаря замене производной по координате в граничном условии конечной разностью и некоторым матричным преобразованием над исходными данными задачи. Степень аппроксимирующих полиномов может быть подобрана на основании технологического, теплового и газодинамического анализа характера условий идентифицируемого технологического процесса, а также с учетом принципа невязки [3].

Второй предложенный метод – аппроксимация функции параметра отрезками полиномов невысокой степени. Такое представление искомой функции позволяет учесть все возможные локальные экстремумы функции параметра на рассматриваемом промежутке времени. Используя кубические сплайны, требуется выполнение условий сопряжения в узлах, а именно: непрерывность функции и первых двух ее производных во всех внутренних точках. В таком случае нет разрывов и резких перегибов функции.

Известны также методы решения задачи, использующие эволюционные подходы [7].

Целью данной статьи является применение эволюционных техник для решения описанных задач параметрической идентификации. С этой целью разрабатывается генетический алгоритм идентификации параметра лучистого теплообмена. Основной идеей является аппроксимация данного параметра полиномом n -й степени, которая будет определять кодирование особей в ГА.

Постановка задачи. Рассматривается задача идентификации распределенных во времени параметров конвективного и лучистого теплообмена в граничных условиях третьего рода задачи теплопроводности [1, 2]. Математическая модель процесса нагрева одномерного тела выглядит следующим образом

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq s, \quad (1)$$

с нелинейными граничными условиями третьего рода, задающими тепловой поток излучением по закону Стефана-Больцмана

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=0} = \sigma_1(\tau) \cdot (T_{gr}(\tau)^4 - T(\tau, 0)^4), \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=s} = \sigma_2(\tau) \cdot (T_{gr}(\tau)^4 - T(\tau, s)^4), \quad (3)$$

и начальным условием

$$T(x, 0) = t_0(x), \quad (4)$$

где $T(x, \tau)$ – температура тела; x – пространственная координата; τ – время; s – толщина тела; $T_{gr}(\tau)$ – температура греющей среды; α – коэффициент теплопроводности тела; $\sigma_1(\tau)$, $\sigma_2(\tau)$ – параметры теплоотдачи излучением сверху и снизу.

В результате измерений известна температура тела на границе с внешней средой в r моментах времени

$$T(0, \tau_k) = f_k, \quad k = \overline{1, r}.$$

Для простоты изложения метода предполагаем нагрев симметричным, поэтому $\sigma_1(\tau) = \sigma_2(\tau) = \sigma(\tau)$.

Задача идентификации состоит в нахождении $\sigma(\tau)$ как непрерывной функции времени. С целью параметризации искомой

функции, т.е. сведения задачи к нахождению заданного числа неизвестных параметров, предлагается ее аппроксимация полиномом некоторой степени n

$$\sigma(\tau) = a_0 + a_1\tau + \dots + a_n\tau^n.$$

Неизвестная функция, описывающая изменение параметра, может иметь достаточно сложный вид, например, иметь множество локальных экстремумов. Однако в пределах одной обогреваемой газом зоны, исходя из физики процесса теплоотдачи, можно вполне предположить о наличии только одного максимума. В этом случае задача идентификации сводится к идентификации неизвестных коэффициентов полиномов a_0, a_1, \dots, a_n невысокой степени.

В качестве меры ошибки идентификации воспользуемся квадратичным критерием вида

$$I(a_0, a_1, \dots, a_n) = 1/r \sum_{i=1}^r [T(0, \tau_i) - f_i]^2. \quad (7)$$

Для решения задачи теплопроводности (1) – (4) используем метод конечно-разностной аппроксимации. В области $0 \leq x \leq l$, $0 \leq \tau \leq \tilde{\tau}$ введем равномерную сетку $\omega_{i,j}$, т.е. будем рассматривать температуру в узлах сетки $T(j\Delta x, i\Delta\tau)$, где $\Delta x = s/m$, ($j = \overline{0, m}$, $i = \overline{0, r}$), $\Delta\tau$ и Δx – длина шага по времени и по пространственной координате соответственно, $m+1$ – количество точек по толщине тела.

Применив явную конечно-разностную схему аппроксимации, получим представление уравнения теплопроводности в виде:

$$T_{j,i+1} = c_1 T_{j-1,i} + (1 - 2c_1) T_{j,i} + c_1 T_{j+1,i}, \quad (8)$$

где $c_1 = a\Delta\tau / \Delta x^2$. Условие устойчивости явной схемы связывает шаги сетки следующим соотношением: $c_1 \leq 0,5$.

В граничных условиях производные $\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=0,s}$ аппроксимируются

конечными разностями второго порядка точности:

$$\begin{aligned} -\lambda(-3T_{0,i} + 4T_{1,i} - T_{2,i}) / (2\Delta x) &= \sigma_i(T_{gr,j}^4 - T_{0,i}^4), \\ \lambda(3T_{m,i} - 4T_{m-1,i} + T_{m-2,i}) / (2\Delta x) &= \sigma_i(T_{gr,j}^4 - T_{m,i}^4), \end{aligned} \quad (9)$$

где σ_i – значение полинома в момент времени i и

$$\sigma_i = a_0 + a_1 i \Delta\tau + \dots + a_n i^n (\Delta\tau)^n, \quad i = \overline{0, r}, \quad r \gg n.$$

Простой генетический алгоритм. В [8] предложен генетический подход, который хорошо зарекомендовал себя при решении комбинаторных NP-полных задач, породив волну исследовательского интереса к области эволюционных вычислений [9 – 11]. В широком смысле термин "генетический алгоритм" (ГА) применяют для обозначения любой математической модели, которая основана на популяциях и использует эволюционные операции для построения новой выборки точек в пространстве поиска.

Опишем кратко простой генетический алгоритм. Данное описание в основном базируется на [11]. Пусть задана произвольная задача и её пространство решений, в котором будет производиться поиск. Решение задачи с помощью ГА предполагает, что любая точка в заданном пространстве решений может быть закодирована как строка битов (x_1, x_2, \dots, x_n) . Такая строка называется особью, а некоторый произвольный набор особей называется популяцией. Каждой особи ставится в соответствие значение оценочной функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которое показывает: насколько близко данная особь приблизилась к решению поставленной задачи. Таким образом, решение задачи предполагает поиск минимума (максимума) некоторой многомерной функции f . Проблемы кодирования решений и построения оценочной функции являются центральными при решении задачи с помощью генетического алгоритма.

В целом поиск решения задачи с помощью ГА состоит из итеративного процесса порождения новой популяции на основании текущей с помощью набора эволюционных операций. Общая схема простого ГА представлена ниже.

Алгоритм А1.

ГенетическийАлгоритм(Параметры)

{

Pop_{нач} = ПостроениеНачальнойПопуляции($N_{особ}$);

ОценитьПопуляцию($Pop_{нач}, A_0, N_{особ}$);

ВычислитьФитнессФункцию ($Pop_{нач}, N_{особ}$);

Pop_{тек} = Pop_{нач} ;

НомерПопуляции=0;

// основной цикл по поколениям

while (НедостигнутКритерийОстановки())

{

```
ВычислитьФитнессФункцию (  $Pop_{тек}$  ,  $N_{особ}$  ) ;  
// цикл построения промежуточной популяции  
while ( СтроитсяНоваяПопуляция ( ) )  
{  
    Родители=ОперацияСелекции ( ) ;  
    Потомки=ОперацияСкрещивания (Родители) ;  
    Потомки=ОперацияМутации (Потомки) ;  
    ДобавлениеВНовуюПопуляцию (Потомки) ;  
} // конец while – построение новой популяции  
ОценитьПопуляцию (  $Pop_{тек}$  ,  $N_{особ}$  ) ;  
НомерПопуляции++;  
АдаптацияПараметров ( ) ;  
} // конец while – достигнут критерий останова  
СортироватьПопуляциюПоОценке (  $Pop_{тек}$  ) ;  
// решение=лучшая особь в посл. популяции  
Решение=ТекущаяПопуляция [ 0 ] ;  
}
```

Процесс поиска решения обычно начинается со случайно сгенерированной популяции или предполагаемого решения. Выполнение одной итерации генетического алгоритма часто разбивают на два шага. Первый шаг: из текущей популяции строится промежуточная. Выбор особей для промежуточной популяции называется селекцией. Она выполняется сразу после вычисления фитнес функции f_i / \bar{f} для каждой особи в популяции. Чаще всего реализуется метод "рулетки", когда вероятность особи с номером i попасть в промежуточную популяцию пропорциональна её фитнес функции f_i / \bar{f} . При этом создаётся копия выбранной особи, которая помещается в промежуточную популяцию.

На втором шаге из промежуточной популяции строится популяция следующего поколения. Для этого над особями промежуточной популяции выполняются некоторые трансформирующие эволюционные операции, под воздействием которых особи могут получить новые свойства и тем самым улучшить свою оценочную функцию. Обычно сюда входят операции скрещивания и мутации.

Скрещивание – это операция объединения хромосом двух особей-родителей (иногда более), в результате которой получают особи-потомки с новыми свойствами. Вероятность применения операции скрещивания перед помещением выбранных особей в популяцию следующего поколения считается заданной и равна P_c .

После скрещивания применяется операция мутации, для которой также задаётся вероятность применения P_m . Она реализуется как случайное изменение генов в особях всей популяции. Цель данной операции – направить поиск в неисследованные регионы пространства поиска и предотвратить его сходимость к локальным экстремумам. Обычно вероятность мутации битов выбирается постоянной и достаточно малой: менее 1%.

Таким образом, процесс эволюции реализуется как замена (полная или частичная) особей популяции на новые, после чего снова происходит вычисление их оценочных и фитнес функций. Механизм выживания "сильнейших" особей является попыткой формализации использования накопленной в процессе эволюции информации. Порождение новых популяций прекращается, когда найдено решение проблемы или выполняются установленные критерии, например, превышено число итераций.

Генетический алгоритм идентификации параметра $\sigma(\tau)$ в задаче теплопроводности. Из описания в предыдущем разделе видно, что конкретная задача, решение которой требуется найти с помощью ГА, является для неё "чёрным ящиком". На его вход подаются параметры, определяемые кодированием особи, а на выходе наблюдаются реакции, определяющие её оценку.

Для получения из общей схемы ГА реализации конкретного метода необходимо конструктивно задать следующие компоненты: кодирование особи и популяции; вид оценочной функции; вид применяемых генетических операций; критерии останова работы алгоритма.

Идентифицируемым параметром задачи является параметр лучистого теплообмена σ . В общем виде он представляется полиномом n -й степени, который при программной реализации задаётся массивом коэффициентов. Набор массивов определяет популяцию заданного размера.

"Чёрным ящиком", определяющим оценочную функцию, является уравнение теплопроводности (1). Оно используется дважды. В начале алгоритма с его помощью вычисляется массив температур, показывающий её изменение во времени. Далее в программе он используется в качестве эталона $T_{эт}$ для вычисления оценки каждой особи o_i следующим образом. Задача теплопроводности получает текущую особь o_i в качестве параметра, на основании которого и начальных условий происходит решение прямой задачи: определение зависящего от времени массива температур $T(o_i) = T(\sigma)$. Далее оценка $f(o_i)$ особи вычисляется на основании квадратичного функционала (7).

Поскольку в нашей задаче (7) уменьшается с ростом точности аппроксимации входного параметра "чёрного ящика", то в качестве оценки используется обратная к (7) величина, которая растёт с ростом точности.

Поскольку в предлагаемом методе, в отличие от базового двоичного кодирования, используется кодирование с помощью массивов вещественных чисел, то используются генетические операции, определённые для такого применения. Применение вещественного кодирования в ГА широко исследовано, мы в основном используем подход, описанный в [12].

В качестве оператора скрещивания используется $BLX - \alpha$ кроссовер. Генерируется один потомок, являющийся вещественным числом из интервала $[c_{\min} - \Delta \cdot \alpha, c_{\max} + \Delta \cdot \alpha]$, где:

$$\begin{aligned} c_{\max} &= \max(c_i^1, c_i^2), \\ c_{\min} &= \min(c_i^1, c_i^2), \\ \Delta &= c_{\max} - c_{\min}, \quad i = 1, n. \end{aligned} \tag{10}$$

Здесь c_i – i -й коэффициент полинома σ . Коэффициент α определяется экспериментально.

Вид оператора мутации определяется аналогично, но для одного коэффициента c_i .

Экспериментальные результаты. Предложенный генетический алгоритм идентификации параметра σ был реализован программно на языке C++, объём реализации составил около 800 строк кода.

При проведении машинных экспериментов степень полинома аппроксимации σ была выбрана 3. Максимальное значение параметра σ , которое допустимо для полинома аппроксимации 2,0. Если для заданной особи значение превышало данный порог, то такая особь отбрасывалась и не рассматривалась как потенциальное решение.

В качестве эталона $\sigma_{\text{ЭТ}}$ выбран полином с коэффициентами (-1.0, 2.0, 2.0). С заданным $\sigma_{\text{ЭТ}}$ решается прямая задача теплопроводности и определяется эталонный массив температур $T_{\text{ЭТ}}$. Размер массива определяется технологическим процессом: скоростью движения заготовки и временем нагрева. Число контрольных точек температуры по сечению заготовки при решении задачи теплопроводности – 4.

Другие численные параметры ГА: число особей в популяции постоянно и равно 100; максимальное число поколений – 100; вероятность скрещивания 0,99; вероятность мутации 0,1; число поколений без улучшения оценки – 10; коэффициент α в операторах

скрещивания и мутации – 0,1. Данные значения определены на основании машинных экспериментов и позволяют решать задачу с приемлемой точностью. При указанных параметрах время работы ГА составило 15 – 18 сек, полученное значение параметра σ позволяет определить температуру на поверхности с точностью 0.5 – 5 градусов Цельсия относительно эталонных значений. Отметим, что дальнейшая "настройка" параметров ГА позволяет существенно повысить точность решения задачи, до сотых градуса, за счёт увеличения глубины поиска.

Основные результаты и выводы. В статье предложен метод идентификации параметра лучистого теплообмена в заданных граничных условиях задачи теплопроводности. Метод основан на применении простого ГА с вещественным кодированием. Применены вещественные генетические операции, вычисление оценки реализовано на основании квадратичного функционала отклонения массива температур модели, использующей исследуемый параметр, от "эталонных" значений.

Реализованный метод позволяет решить задачу идентификации параметра за приемлемое время и моделировать температуру технологического процесса с точностью до десятых долей градуса.

В качестве дальнейших исследований можно отметить применение предложенного метода для задачи идентификации пары заданных параметров задачи теплообмена.

Список литературы: 1. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1974. – 285 с. 2. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности, в 2-х т. / Ю.М. Мацевитый. – Киев: Наукова думка, 2003. – 408 с. 3. Бэк Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бэк, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр мл. – М.: Мир, 1989. – 312 с. 4. Алифанов О.М. Экстремальные методы решения некорректных задач / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, С.В. Румянцев. – М.: Наука, 1988. – 288 с. 5. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. – Серия "Задачи и методы: математика, механика, кибернетика" Том 13 / В.Н. Ткаченко. – Киев: Наукова думка, 2008. – 243 с. 6. Ткаченко В.Н. Методы идентификации распределенных параметров на основе метода наименьших квадратов и ортогональных функций / В.Н. Ткаченко, О.В. Литовченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 3 (174). – Ч. 2. – С. 141-148 7. Majchrzak E. Application of evolutionary algorithm in identification of solidification parameters / E. Majchrzak, J. Mendakiewicz, M. Paruch // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 23. – Issue. 2. – P. 67-70. 8. Goldberg D.E. Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning / D.E. Goldberg. – Boston, MA: Addison-Wesley Longman Publishing Co, 1989. – 412 p. 9. Holland J.P. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control and Artificial Intelligence / J.P. Holland. – Ann Arbor MI: University of Michigan, 1992. – 228 p. 10. Скобцов Ю.А. Основы эволюционных вычислений / Ю.А. Скобцов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с. 11. Иванов Д.Е. Генетические алгоритмы построения входных идентифицирующих последовательностей цифровых устройств / Д.Е. Иванов. – Донецк, 2012. – 240 с.

12. Herrera F. Tackling real-coded genetic algorithms: operators and tools for the behavior analysis / F. Herrera, M. Lozano, J.L. Verdegay // *Artificial Intelligence Review*. – 1998. – Vol. 12. – №. 4. – P. 265-319.

References:

1. Tixonov, A.N., and Arsenin, V.Ya. (1974), *Methods for solving ill-posed problems*, M.: Nauka, 285 p.
2. Macevityj, Yu.M. (2003), *Inverse heat conduction problems*, Kiev: Naukova dumka, 408 p.
3. Be'k, Dzh., Blakue'll, B., and Sent-Kle'r jn., Ch. (1989), *Incorrect inverse heat conduction problems*, M.: Mir, 312 p.
4. Alifanov, O.M., Artyuxin, E.A., and Rumyancev, S.V. (1988), *Extreme methods for solving ill-posed problems*, M.: Nauka, 288 p.
5. Tkachenko, V.N. (2008), *Mathematical modeling, identification and control of technological processes of heat metal treatment, Series "Problems and methods of mathematics, mechanics and cybernetics"*, Vol. 13, Kiev: Naukova dumka, 243 p.
6. Tkachenko, V.N., and Litovchenko, O.V. (2012), "Methods of identification of distributed parameters based on the least squares method", *Bulletin of East Ukrainian National University named after Dahl*, No. 3 (174), Ch.2, pp. 141-148.
7. Majchrzak, E., Mendakiewicz, J., Paruch, M. (2007), "Application of evolutionary algorithm in identification of solidification parameters", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol.23, Issue. 2, pp. 67-70.
8. Goldberg, D.E. (1989), *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Boston, MA: Addison-Wesley Longman Publishing Co, 412 p.
9. Holland, J.P. (1992), *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Application to Biology, Control and Artificial Intelligence*, Ann Arbor MI: University of Michigan, 228 p.
10. Skobcov, Yu.A. (2008), *Base of evolutionary computation*, Donetsk: DonNTU, 326 p.
11. Ivanov, D.E. (2012), *Genetic algorithms for constructing of input identifying sequences of digital devices*, Donetsk, 240 p.
12. Herrera, F., Lozano, M., and Verdegay, J.L. (1998), "Tackling real-coded genetic algorithms: operators and tools for the behavior analysis", *Artificial Intelligence Review*, Vol. 12, No. 4, pp. 265-319.

Статью представил д-р техн. наук, проф. Донецького національного технічного університету Фёдоров Е.Е.

Поступила (received) 21.06.2016

Ivanov Dmitry, Dr.Sci.Tech, Ass. Professor
Institute of Applied Mathematics and Mechanics,
Str. Gen. Batyuka, 19, Slavyansk, 84100
Tel: (067) 281-26-48, e-mail: Dmitry.ivanov.iamm@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9956-6589

Tkachenko Valerij, Dr.Sci.Tech, Professor
Institute of Applied Mathematics and Mechanics,
Str. Gen. Batyuka, 19, Slavyansk, 84100
Tel: (066) 502-15-54, e-mail: valeryi_don@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001-9956-6589

УДК 62-50:621.783.22:66.096.5

Генетичний алгоритм ідентифікації параметра променистого теплообміну в заданих граничних умовах / Іванов Д.Є., Ткаченко В.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 31 – 41.

Розглядається задача ідентифікації параметра променистого теплообміну в задачах теплопровідності в заданих граничних умовах. Запропоновано новий метод розв'язання задачі, який засновано на генетичному алгоритмі. Ідентифікований параметр апроксимується поліномом n -го ступеня, коефіцієнти якого визначають особини в генетичному алгоритмі. Виконано програмну реалізацію методу та проведено машинні експерименти. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: ідентифікація параметра, променистий теплообмін, задача теплопровідності, генетичний алгоритм.

УДК 62-50:621.783.22:66.096.5

Генетический алгоритм идентификации параметра лучистого теплообмена в заданных граничных условиях / Иванов Д.Е., Ткаченко В.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216) – С. 31 – 41.

Рассматривается задача идентификации параметра лучистого теплообмена в задаче теплопроводности в заданных граничных условиях. Предложен новый метод решения задачи, который основан на генетическом алгоритме. Идентифицируемый параметр аппроксимируется полиномом n -й степени, коэффициенты которого определяют особь в генетическом алгоритме. Выполнена программная реализация метода и проведены машинные эксперименты. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: идентификация параметра, лучистый теплообмен, задача теплопроводности, генетический алгоритм.

UDC 62-50:621.783.22:66.096.5

Genetic algorithm for parameter identification of the radiant heat transfer in the given boundary conditions / Ivanov D.E., Tkachenko V.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216). – P. 31 – 41.

The identification problem of parameter of radiant heat conduction in the given boundary conditions is discussed. A new method of solving this problem, which based on genetic algorithm. The identified parameter is approximated by a polynomial of n -th degree that determine the coding of the individuals in genetic algorithm. Software implementation was made and the machine experiments was performed. Refs.: 12 titles.

Keywords: identification problem of parameter, radiant heat conduction, heat conduction problem, genetic algorithm.

И.А. КОТОВ, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ "КНУ", Кривой Рог

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУТЕМ ИНКОРПОРАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ОНТОЛОГИЙ

Рассмотрена проблема автоматизации систем поддержки решений путем инкорпорации форм представления профессиональных знаний и формирования на их основе иерархии взаимно обусловленных онтологий. На основе формально-лингвистических моделей построены взаимосвязи между моделями представлений и уровнями аппарата исчислений. Приведена процедура обработки онтологических слоев, инвариантная по отношению к уровням обобщения. Ил.: 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: система поддержки решений, онтология, формально-лингвистическая модель, онтологический слой.

Постановка проблемы. В настоящее время уровень развития современных технологических, экономических, социальных систем характеризуется сложностью, требующей качественно новых подходов к принятию управленческих решений. В связи с этим становится особенно актуальной задача моделирования адекватного и эффективного формализма представления профессиональной области для принятия на его основе оптимальных управляющих решений. К такому формализму предъявляются жесткие требования по адекватности представления, наглядности, непротиворечивости, полноте и теоретической глубине применяемого формального языка.

В настоящее время накоплен обширный опыт построения компьютерных автоматизированных систем, основанных на знаниях. Существующие формальные модели позволяют строить базу знаний (БЗ) для управляющих экспертных систем различного типа. Подобные системы обязательно учитывают динамизм, одновременность и параллельность цепей контролируемых событий. Однако, сегодня во многих профессиональных средах даже применение мощных средств вычислительной техники не обеспечивает достаточный уровень оперативности решения проблемы.

Проблема управления стоит особенно остро для кризисных ситуаций. Под кризисной ситуацией понимается аварийная ситуация природного, техногенного или социального характера, для ликвидации которой в текущих условиях ресурсы недостаточны или отсутствуют. Иными словами, кризисная ситуация такова, что никак не может быть ликвидирована в текущий момент времени с использованием имеющихся

временных, материальных, финансовых, людских и прочих ресурсов. Можно говорить лишь о снижении ущерба от кризисной ситуации и о ликвидации ее последствий. Лицо, принимающее решение (ЛПР) в кризисной ситуации, реализованное даже в виде коллективного разума, не в состоянии адекватно реагировать в требуемом темпе. Главными причинами такого положения являются – чрезвычайно большой объем информации, требующей безошибочной оценки за минимальное время, и психологическое давление на ЛПР вследствие повышенной ответственности. Одним из наиболее эффективных направлений в снижении остроты указанной проблемы представляется разработка автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР).

При этом теоретическая разработка и внедрение в производство унифицированной, интегральной модели представления онтологий в СППР является актуальной проблемой. Такая модель обеспечит динамические переходы между различными формами представления знаний в рамках одной экспертной системы при динамическом изменении факторов, условий или требований к управлению технологическими процессами в кризисных ситуациях.

Анализ литературы. К настоящему времени накоплен обширный теоретический материал, посвященный представлению и использованию знаний в системах поддержки процесса управления. Имеется множество программных решений, отличающихся, как теоретической глубиной проработки материала, так и мощностью практической реализации [1 – 5]. Однако, для большинства таких систем можно отметить значительное превалирование их теоретического базиса над практическим эффектом. Многие практические реализации СППР, действующие в практической среде автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), являются узко специализированными и дорогостоящими. Кроме того, подавляющее большинство реальных СППР, как подмножество систем искусственного интеллекта (СИИ), имеют асинхронный и ярко выраженный интерактивный характер работы, что делает не эффективным их применение в кризисных ситуациях в режиме реального времени.

Анализ технических источников в рассматриваемой области, указывает на существование ряда систем, обладающих в определенной степени интегральными возможностями представления знаний. К таким системам можно отнести: ЭС ПРКС [6], ФИАКР [7], ТОП, СПОР [8], REACTOR [9], Alice [10] и другие. Следует отметить, что многие из этих интеллектуальных систем, используя системный подход в представлении знаний, достигают приемлемых результатов в конкретных проблемных областях. Однако, известные системы обладают также рядом существенных недостатков, характеризующихся значительным

усложнением формального языка и сужением границ проблемных областей. Однако, главной проблемой является использование специфических, индивидуальных форм представления знаний, что приводит к ограничению и узкой специализации СППР.

В области построения систем поддержки управленческих решений большой вклад внесли отечественные и зарубежные ученые – Башлыков А.А., Венделин А.Г., Геловани В.А., Евланов Л.Г., Заде Л.А., Ларичев О.И., Любарский Ю.Я., Лорьер Ж.Л., Люггер Дж.Ф., Поспелов Д.А., Саати Т., Самойлов В.Д., Таунсенд К., Терелянский П.В., Ульман Дж., Уотермен Д., Фишберн П.К., Форсайт Ф. и многие другие. Проведенный анализ показывает отсутствие единых подходов к построению онтологической базы хранилищ знаний.

В связи с этим теоретическая разработка и практическое внедрение унифицированной, интегральной модели инкорпорации профессиональных онтологий в СППР является актуальной научной проблемой. Такая модель обеспечит динамические переходы между различными формами представления знаний в рамках одной экспертной системы при динамическом изменении факторов, условий или требований к управлению технологическими процессами в кризисных ситуациях.

Цель статьи – разработка методов, моделей и средств унификации форм представления знаний в системах поддержки решений.

Наибольшее значение СППР имеют в среде АСУТП при управлении технологическими процессами в кризисных ситуациях. Подобные ситуации требуют динамического использования различных форм представления знаний в рамках одной интеллектуальной системы. Данный подход может быть реализован на базе единой модели инкорпорации профессиональных онтологий, описывающих технологические объекты и процессы. При таком подходе каждая используемая форма представления знаний будет являться частным случаем (частной формой) общей модели. Тогда динамический переход от одной формы представления знаний к другой может осуществляться путем ввода соответствующих ограничений или условий.

Поставленная цель требует разработки общей формально-языковой модели организации базы знаний. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать и систематизировать кризисные ситуации естественного, техногенного и социального характера.
2. Провести анализ форм представления знаний и применимости формальных моделей для различных профессиональных областей.

3. Сформулировать подход к методу иерархической унификации различных форм представления знаний.
4. Разработать общую функциональную схему и блок-схему алгоритма исследуемого процесса.
5. Разработать формальные модели унификации для каждой формы представления знаний.
6. Протестировать и реализовать программные модели унифицированного представления системы знаний.
7. Разработать программу, методику испытаний и критерии оценки эффективности программных решений на основе унификации форм представления знаний.
8. Провести экспериментальные исследования и проверку эффективности разработанных методов унификации форм представления знаний.

Иерархическая система профессиональных онтологий. Одной из основных проблем, которую необходимо решить при создании СППР, является разработка целостной технологии работы со знаниями [10, 11]. Последнее предполагает наличие развитых языков представления знаний (ЯПЗ). Анализ современных интеллектуальных систем показывает, что наиболее мощными, широко распространенными и хорошо зарекомендовавшими себя являются такие формы представления знаний, как продукции, семантические сети, фреймы, аппарат логики предикатов и другие. Каждый из указанных подходов характеризуется своими достоинствами в применении к конкретным проблемным областям.

В частности, представление знаний в виде семантических сетей характеризуется простотой, возможностью расширения, однако предоставляет пользователю статическую информацию об объекте, явлении. С помощью семантических сетей зачастую невозможно отобразить функционирование сложных динамических объектов.

Системы продукции, удовлетворительно отображая динамику и логику действий, плохо приспособлены для описания внутренних структур, связей и свойств объекта.

Фреймы дополняют аппарат семантических сетей новыми возможностями и имеют большую мощность, однако накладывают дополнительные ограничения. Фрейм, являясь замкнутой структурой с заранее обозначенными слотами, имеет в каждый момент времени некоторое количество пустых слотов или содержащих устаревшую информацию, а также не обеспечивает возможность ввода не предусмотренного заранее вида информации.

Представление знаний и получение вывода с помощью логики предикатов связано с практически непреодолимыми трудностями

практического использования формального аппарата при решении реальных задач большого объема.

Проведенный анализ свидетельствует, что создание и развитие систем искусственного интеллекта и, в частности, СППР требует исключительно комплексного подхода, основанного на синтезе лучших качеств разработанных форм и средств представления знаний. В данной работе предлагается следующая градация уровней инкорпорации форм представления знаний. Дадим вначале неформальное ее описание:

– уровень S (signal) представляет собой реакции организма человека на внешние раздражители или сигналы. Эти знания отличаются атомарностью, несвязностью и отсутствием конкретного смысла;

– уровень A (axioms) представляет собой так называемые "пассивные знания" или "знания-описания", не требующие доказательства, – аксиомы, факты. Они описывают понятия, характеризуют взаимное расположение объектов, их качественные и количественные свойства;

– уровень O (object) представляет собой развитые взаимно релевантные системы фактов, образующие смысловые сети произвольных конфигураций, в том числе и многослойные, исчерпывающе характеризующие объекты;

– уровень L (logic) представляет собой логические, причинно-следственные взаимодействия между объектами, правила их взаимодействия, динамику систем объектов;

– уровень D (dialectics) представляет собой системные знания, метазнания (диалектику), реализующие системный подход к управлению знаниями низших уровней.

Таким образом, можно констатировать, что предлагаемая инкорпорация знаний описывает мир в целом, где все объекты и явления имеют вполне определенные качественную и количественную сущности, развитие их подчинено причинно-следственным законам, а устойчивость всей системы поддерживается строгим контролем меры в соотношении указанных свойств. Каждому уровню поставим в соответствие формы представления знаний, а каждой форме представления – аппарат исчисления информационных формализмов. В предложенной модели каждый высший уровень является онтологией (дескриптором, описателем) знаний низшего уровня, а все уровни вместе образуют законченную инкорпорацию онтологий. На основе вышеизложенного предложена следующая интерпретация иерархии онтологий (рис. 1).

В контексте приведенной иерархии предлагается полагать следующий смысл в рассматриваемых формах представления знаний. Атом – лексема в контексте языка, используемая исключительно целиком. Факт и фрейм – заранее жестко определенная структура атомов,

единая для всей базы знаний. Семантическая сеть – направленный граф произвольной структуры, в котором вершины и ребра являются семантическими единицами – фактами или фреймами. Продукция – импликативное выражение, связывающее семантические сети причинно-следственной зависимостью. При этом обычно продукция имеет один выход. В качестве продукции могут использоваться логические пропозициональные связки семантических сетей, соответствующие логике высказываний. Консеквенты одних продукций могут использоваться в качестве антецедентов других продукций, вследствие чего образуются продукционные сети. Метазнания – это методы (правила), определенные не в контексте самой базы знаний, а в контексте системы, реализующей эвристику по отношению к базе знаний.

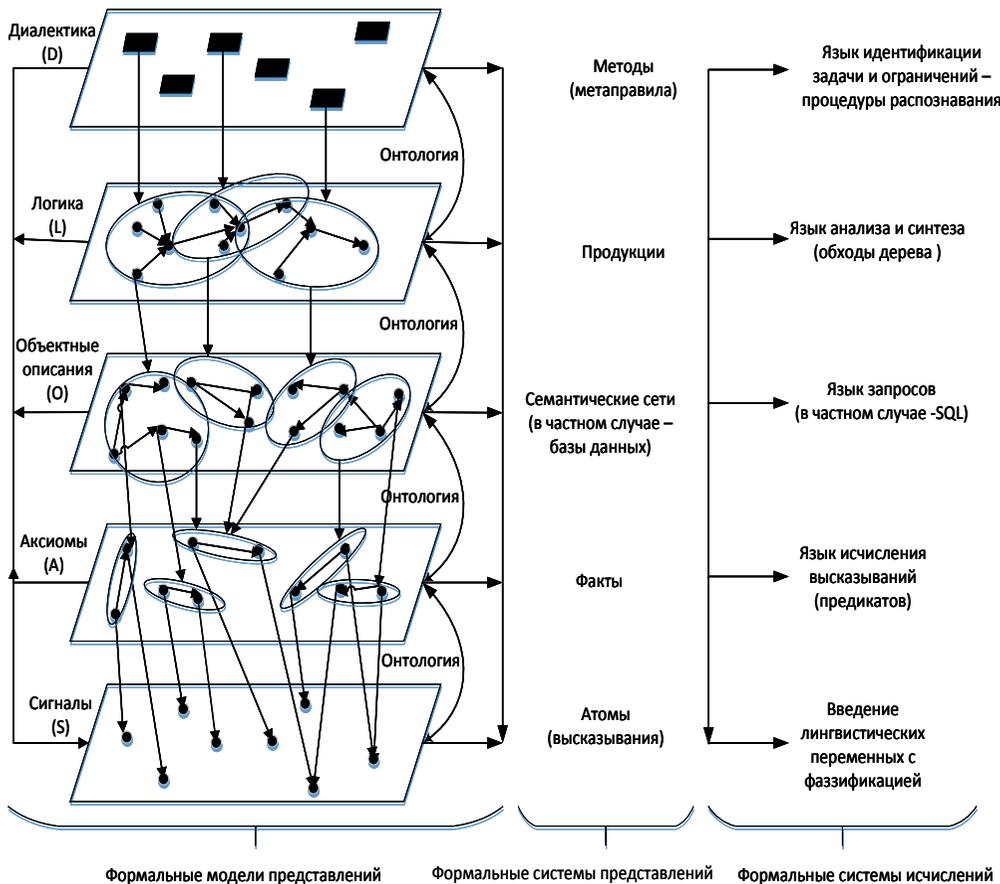


Рис. 1. Иерархическая инкорпорация онтологий интеллектуальной компьютерной системы

Таким образом, в соответствии с предложенной иерархией, можно отобразить простейшую обобщенную функциональную модель базы знаний в виде, приведенном на рис. 2.

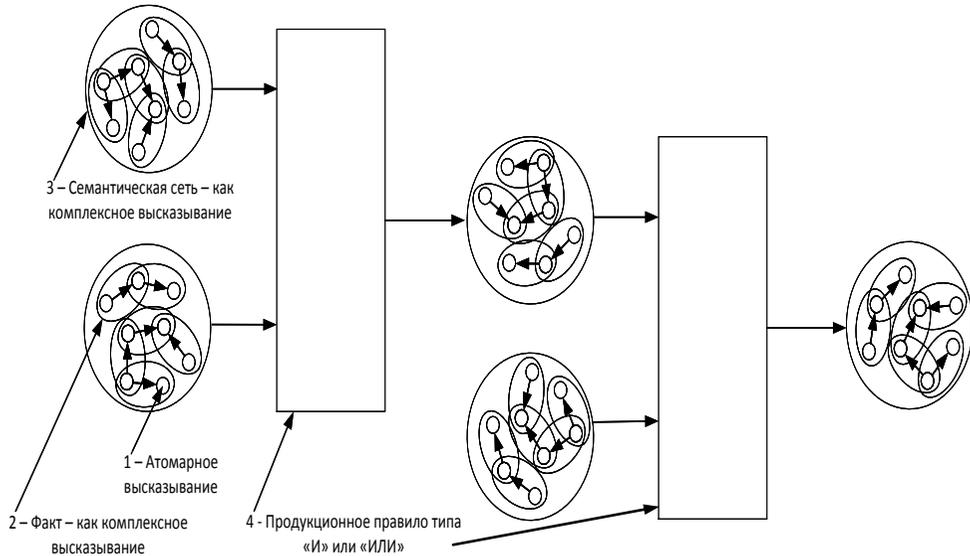


Рис. 2. Интегральное использование знаний в СППР

На рисунке числами обозначены соответственно: 1 – атомарное высказывание, 2 – факт, 3 – семантическая сеть, 4 – продукционное правило типа "И" или "ИЛИ".

Как видно, знания в предложенной системе представляют собой сетевые структуры с направленными связями. Важной особенностью таких структур является возможность осуществления взаимодействия знаний различных уровней с помощью связей между ними. Установление связей между уровнями в любой момент времени приводит к образованию подсистемы, обладающей всеми свойствами низших уровней. Здесь можно говорить о наследовании уровней в терминах объектно-ориентированной парадигмы. Подобная иерархия позволяет организовать доступ к любому уровню знаний в отдельности. Возьмем за основу общую модель формального языка для унифицированной системы онтологий, заданного через его грамматику

$$L(G) = \langle \Sigma, N, P, S \rangle, \quad (1)$$

где G – формальная грамматика;
 Σ – основной конечный терминальный алфавит;
 N – вспомогательный конечный нетерминальный алфавит;
 P – правила подстановки (продукции) формальной грамматики:

$\exists a, \exists b, (a, b) \in P : a \rightarrow b ;$

S – стартовый нетерминальный символ грамматики G ;

$$N \cap \Sigma = \emptyset \text{ и } P \subset ((N \cup \Sigma)^+ \times (N \cup \Sigma)^*).$$

На этой основе можно формализовать языки уровней предлагаемой схемы унификации знаний – $L(G)_k, k = \{S, A, O, L, D\}, G$ – грамматики, порождающие синтаксис языков каждого уровня.

Естественно, что, как минимум, множества Σ_k для разных предметных (профессиональных) областей будут содержательно отличаться. Следовательно, будут различаться частные языки $L(G)_k$. Поэтому, с учетом специфики различных предметных (профессиональных) областей необходимо рассматривать множество $L(G)_k^b$, где $b \in B', B' \subseteq B, B$ – множество профессиональных областей, которые могут подвергаться анализу; B' – подмножество профессиональных областей, для которых рассматривается строительство интеллектуальных систем.

При формировании онтологии каждого уровня необходимо учитывать неполноту (нечеткость) используемых атомарных высказываний. Поэтому информационное поле уровней необходимо рассматривать как структурированное множество нечетких лингвистических переменных [12].

Примем, что в каждом формальном языке уровней предлагаемой модели $L(G)_k^b$ элементы алфавита каждого уровня являются лингвистическими переменными, прошедшими операцию фазсификации. Тогда для b -й профессиональной области k -го уровня иерархии онтологий имеем:

$$A_k^b = \{a_k^b \mid a_k^b : \langle \beta, T, X, G, M \rangle\}, \quad (2)$$

где β – идентификатор лингвистической переменной;

T – базовое терм-множество значений лингвистической переменной;

X – область определения лингвистической переменной a_k^b с именем β ;

G – грамматика (синтаксическая процедура) генерации новых значений для переменной a_k^b ;

M – семантическая процедура формирования нечеткого множества.

Тогда, с учетом (2)

$$L(G)_k^b = \langle A_k^b, N_k^b, P_k^b, S_k^b \rangle \quad (3)$$

или

$$L(G)_k^b = \langle \langle \beta^b, T^b, X^b, G^b, M^b \rangle, N_k^b, P_k^b, S_k^b \rangle. \quad (4)$$

В работе предлагается многоуровневая система инкорпорации онтологий, выражаемых их формальными языками. Причем, языки верхних уровней являются обобщениями языков подлежащих уровней.

Таким образом, математическая модель унифицированной инкорпорации онтологий будет представляться классом языков в некоторой профессиональной области $b \in B', B' \subseteq B$, для которых справедливо выражение

$$L(G)_S^b \subset L(G)_A^b \subset L(G)_O^b \subset L(G)_L^b \subset L(G)_D^b. \quad (5)$$

Для построения данной иерархии примем, что алфавит языка каждого уровня можно разбить на два подмножества: Σ^f – подмножество базовых (фундаментальных) символов, образующих предметный понятийный аппарат, основанный на интерпретации, Σ^r – подмножество символов, используемых в качестве отношений – R . То есть

$$R = \Sigma^r, \Sigma = \Sigma^f \cup R. \quad (6)$$

При нормализации базы знаний и отсутствии избыточности

$$\Sigma^f \cap R = \emptyset.$$

Тогда представление структуры базы знаний (KB_k^b) каждого уровня отобразится кортежем

$$KB_k^b = \langle \Sigma^f, R \rangle, \quad (7)$$

а язык можно интерпретировать как

$$L(G)_k^b = \langle KB_k^b, N_k^b, P_k^b, S_k^b \rangle. \quad (8)$$

Условной точкой входа в иерархию онтологий можно считать $L(G)_D^b$.

Переход на каждый нижний уровень производится путем ввода ограничений на структуру базы знаний и правила грамматики текущего уровня. В свою очередь, переход на каждый верхний уровень производится путем ввода новых отношений и новых суперграмматик.

Введем функцию, отображающую язык одного уровня в язык другого уровня. В контексте разработанной модели для двух соседних уровней можно записать:

$$\begin{aligned} \overline{L(G)_{i+1}^b} &= \Sigma^* - L(G)_i^b = R_{i+1}, \\ \overline{L(G)_{i+1}^b} &= \{a \in \Sigma^*, a \notin \Sigma_i\}, \\ L(G)_{i+1}^b \setminus L(G)_i^b &= \{a \in \Sigma^*, a \in \Sigma_{i+1}, a \notin \Sigma_i\}, \\ F_{i \rightarrow i+1} &= \langle L(G)_i^b \cup \overline{L(G)_{i+1}^b}, C_{i+1} \rangle, \end{aligned}$$

или

$$F_{i \rightarrow i+1} = \langle L(G)_i^b \cup R_{i+1}, C_{i+1} \rangle, \quad (9)$$

где $F_{i \rightarrow i+1}$ – функция порождения языка $(i+1)$ -го уровня на базе языка i -го уровня; C_{i+1} – контекст $(i+1)$ -го уровня, на основе которого производится определение мощности множества $\overline{L(G)_{i+1}^b}$.

Интерпретация последнего выражения заключается в том, что язык следующих уровней образуется путем ввода новых связей, принадлежащих алфавиту языка. В качестве лингвистического контекста уровня C_{i+1} примем языковые единицы уровня $(i+1)$, не входящие в состав языка $L(G)_{i+1}^b$, однако однозначно определяющие смысл высказываний, принадлежащих языку.

Предлагаемый в работе подход не связан с конкретной профессиональной областью и поэтому может рассматриваться как универсальный. Одной из возможных областей применения предлагаемого механизма унификации профессиональных знаний является оперативное противоаварийное управление режимами электроэнергетических систем.

На основе изложенного выше подхода предлагается обобщенный алгоритм вывода на базе знаний. Допустим, что любую задачу, можно представить в виде сетевой структуры. Алгоритм решения, как набор процедур и их описаний, также сравнительно легко может быть отображен сетевым графом. Тогда последовательность этапов решения любой задачи будет иметь итерационный характер и состоять из следующих обобщенных позиций:

1. Задача представляется в виде направленной сетевой структуры.

2. Сетевая структура задачи "накладывается" на сетевую структуру базы знаний.
3. Элементы задачи, совпадающие с элементами базы знаний, считаются "решенными", а элементы базы знаний, связанные с совпадающими элементами задачи, помечаются.
4. Задача преобразуется к новой форме, состоящей из оставшихся элементов.
5. Полным решением будет являться помеченная сетевая структура базы знаний при условии полного совпадения сети исходной задачи. Если это условие не выполняется, то происходит возврат к реализации позиции 2.
6. Если условие выполняется, то осуществляется переход к позиции 7.
7. Конец решения задачи.

Выводы. В работе рассмотрена модель общего информационного контура управления технологическими процессами, определены место и роль информационной системы в оптимизации процесса управления. Обоснована необходимость построения и использования СППР как действенного средства сокращения времени цикла управления. Проведен анализ современных форм представления знаний в системах поддержки решений и предложена единая иерархическая модель с использованием различных форм представления базы знаний. Разработаны единые эвристики по отношению как к отдельным компонентам знаний, так и их структурам. Разработанные модели, подходы и методики инвариантны по отношению к конкретным профессиональным областям и обладают высокой степенью универсальности. Разработанная модель позволяет строить СППР в различных профессиональных областях, используя единый подход и методологию. Это дает возможность повторного использования ранее разработанных блоков интеллектуальных систем в новых приложениях. В конечном итоге, внедрение таких СППР в практику ликвидации кризисных ситуаций в производственных, природных и социальных системах позволит сократить ущербы и повысить качество управления.

Список литературы: 1. *Сараев А.Д.* Системный подход, системный анализ и новейшие информационные технологии / *А.Д. Сараев, О.А. Щербина* // Строительство и техногенная безопасность. – 2005. – Вып. 12. – С. 156-163 2. *Терелянский П.В.* Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования: монография / *П.В. Терелянский*. – Волгоград: ВолгГТУ, 2009. – 127 с. 3. *Иоффин А.И.* Системы поддержки принятия решений / *А.И. Иоффин* // Мир ПК. – М.: Изд-во Открытые системы. – 1993. – № 5. – С. 47-57. 4. *Holsapple C.W.* Decision Support Systems: A Knowledge-based Approach / *C.W. Holsapple, A.B. Whinston*. – St. Paul, Minneapolis: West Publishing Company. – 1996. – 455 p. 5. *Marakas G.M.* Decision support systems in the twenty-first century / *G.M. Marakas*. – Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall, 1999. –

121 р. **6.** Кретов В.С. Экспертная система поддержки принятия решений в кризисных ситуациях / В.С. Кретов // Интернет-журнал Науковедение. – 2010 – № 4 – URL: <http://naukovedenie.ru/sbornik1/1-12.pdf> (02.11.2016). **7.** Сырбу В.Н. Отладка баз знаний в системе ФИАКР. В кн. Прикладные системы искусственного интеллекта. (Математические исследования, вып. 123) / В.Н. Сырбу. – Кишинев: Штиинца, 1991. – С. 57-62. **8.** Интеллектуальные информационные системы в управлении эксплуатацией энергетического комплекса / А.Ф. Дьяков, Ю.Я. Любарский, Ю.И. Моржин и др. // Электричество. – 1994. – № 2. – С. 1-3. **9.** Nelson W.R. REACTOR: an expert system for diagnosis and treatment of nuclear reactor accidents / W.R. Nelson // National conference on artificial intelligence, 18–20 Aug 1982, Pittsburgh, PA (USA). – P. 296-301. **10.** Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц. / Ж.-Л. Лорьер. – М.: Мир, 1991. – 568 с. **11.** Уэно Х. Представление и использование знаний. Пер. с япон. / Под ред. Х. Уэно., М. Исидзука. – М.: Мир, 1989. – 220 с. **12.** Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

References:

1. Saraev, A.D. and Scherbina, O.A. (2005), *System approach, system analysis and the newest information technology, Construction and technological safety*, No. 12, pp. 156-163.
2. Terelyanskiy, P.V. (2009), *Decision support systems. Design Experience: monograph*, VolgGTU, Volgograd, 127 p.
3. Ioffin, A.I. (1993), "Decision Support Systems", *World PC, Open Systems*, No. 5, pp. 47-57.
4. Holsapple, C.W. and Winston, A.B. (1996), *Decision Support Systems: A Knowledge-based Approach*, West Publishing Company, St. Paul, Minneapolis, 455 p.
5. Marakas, G.M. (1999), *Decision support systems in the twenty-first century*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J., 121 p.
6. Kretov, V.S. (2010), "Expert decision support system in crisis cases", *Internet magazine Naukovedenye*, No. 4, available at: <http://naukovedenie.ru/sbornik1/1-12.pdf> (02.11.2016).
7. Syirbu, V.N. (1991), "Debugging knowledge base system FIAKR", in *Application of artificial intelligence systems (Mathematical research)*, No.123, Shtiintsa, Kishinev, pp. 57-62.
8. Dyakov, A.F., Lyubarskiy, Y.Y., Morzhin, Y.I., Ornov, V.G. and Portnoy M.G. (1994), "Intelligent information systems in the management of the exploitation of the energy complex", *Electricity*, No. 2, pp. 1-3.
9. Nelson, W.R. (1982), "REACTOR: an expert system for diagnosis and treatment of nuclear reactor accidents", *National conference on artificial intelligence*, 18–20 Aug 1982, Pittsburgh, PA (USA), pp. 296-301.
10. Lorier, J.-L. (1991), *Artificial Intelligence Systems, Trans. from French*, Mir, Moscow, 568 p.
11. Ueno, H. and Isidzuka, M. (1989), *Presentation and use of knowledge, Trans. from Japan*, in Ueno, H. and Isidzuka, M. (Ed.), Mir, Moscow, 220 p.
12. Zadeh, L.A. (1976), *The concept of linguistic variable and its implementation to the adoption the approximate solutions*, Mir, Moscow, 165 p.

Статью представил д-р техн. наук, проф. ГВУЗ "Криворожский национальный университет", зав. кафедрой моделирования и программного обеспечения Азарян А.А.

Поступила (received) 02.11.2016

Повторно 22.11.2016

Kotov Igor, PhD Tech, Assoc. Prof.
Kryvyi Rih National University
Str. Vyacheslav Chornovil, 41 - 23, Kryvyi Rih, Ukraine, 50093
Tel: (067) 970-17-17, e-mail: ikotov1963@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-2445-6259

УДК 004.89: 519.81

Автоматизація інтелектуальних систем підтримки рішень оперативного керування шляхом інкорпорації професійних онтологій / Котов І.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 42 – 55.

Розглянуто проблему автоматизації систем підтримки рішень шляхом інкорпорації форм подання професійних знань і формування на їх основі ієрархії взаємно обумовлених онтологій. На основі формально-лінгвістичних моделей побудовані взаємозв'язки між моделями уявлень і рівнями апарату обчислень. Наведено процедура обробки онтологічних шарів, яка інваріантна по відношенню до рівнів узагальнення. Іл. : 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: система підтримки рішень, онтологія, формально-лінгвістична модель, онтологічний шар.

УДК 004.89:519.81

Автоматизация интеллектуальных систем поддержки решений оперативного управления путем инкорпорации профессиональных онтологий / Котов И.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 42 – 55.

Рассмотрена проблема автоматизации систем поддержки решений путем инкорпорации форм представления профессиональных знаний и формирования на их основе иерархии взаимно обусловленных онтологий. На основе формально-лингвистических моделей построены взаимосвязи между моделями представлений и уровнями аппарата исчислений. Приведена процедура обработки онтологических слоев, инвариантная по отношению к уровням обобщения. Ил.: 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: система поддержки решений, онтология, формально-лингвистическая модель, онтологический слой.

UDC 004.89:519.81

Automatization of intelligent decision support systems for operational management by incorporating professional ontologies / Kotov I.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (1216). – P. 42 – 55.

The problem of automated decision support systems by incorporation of representation forms of professional knowledge and the formatting of a hierarchy based on their mutual dependence of ontologies. On the basis of the formal-linguistic models built models of the relationship between presentation models and levels of calculus machine. The procedure for processing ontological layers was presented which is invariant for relation to the level of generalization. Figs.: 2. Refs.: 12 titles.

Keywords: decision support system, ontologies, formal-linguistic model, ontological layer.

А.І. КОСОЛАП, д-р. фіз.-мат. наук, проф, зав. каф., Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро

Г.М. КОДОЛА, викл., Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро

ОПТИМІЗАЦІЯ В ЗАДАЧАХ ЛІНІЙНОГО РОЗКРОЮ МАТЕРІАЛІВ

В статті розглянута класична задача лінійного розкрою, яка є NP-складною. Для розв'язку даного класу задач пропонується метод точної квадратичної регуляризації (EQR), який є ефективним для розв'язання задач неперервної оптимізації великої розмірності. Проведені обчислювальні експерименти для задач лінійного розкрою засвідчили перевагу методу EQR над методом розгалужень та границь, як по часу так і по точності розв'язку. Приведені приклади це підтверджують. Табл.: 6. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: лінійний розкрій, оптимізація, метод точної квадратичної регуляризації.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі лінійного розкрою матеріалів виникають в багатьох галузях промисловості: машинобудуванні, металургії, деревообробній та швейній промисловості, целюлозно-паперовій промисловості та ін. Оптимальний розкрій матеріалів дозволяє мінімізувати відходи виробництва, тому даній темі присвячені численні дослідження. Близькою задачею до розкрою є задача лінійного пакування, яка виникає в різних галузях, зокрема в інформаційних системах, наприклад, завдання розподілу обмеженого структурованого ресурсу з метою раціоналізації структури зберігання аналітичної бази даних індивідуальної інформаційної системи – розбиття доступного обсягу ресурсу на квазістатичний і динамічний розділи, перший з яких призначається для постійного зберігання найкращого набору об'єктів, а другий – для динамічного завантаження або генерації рідко запитуваних об'єктів [1].

Значний економічний потенціал, властивий завданням раціонального розкрою, їх невід'ємний зв'язок з реальним виробництвом, а також стрімкий розвиток обчислювальної техніки пояснює актуальність даної теми і донині.

Але розв'язок задач оптимального лінійного розкрою і сьогодні є складною обчислювальною проблемою. Існуючі методи розгалужень та границь для цього класу задач дозволяють отримати розв'язки тільки для

задач малої розмірності, а евристичні та стохастичні методи дають досить часто розв'язки далекі від оптимальних.

Завдання про раціональний розкрій вперше була сформульована Л.В. Канторовичем [2] в 1939 році. Він зазначив, що задача формування такого плану розкрою, яка дозволяє отримати заготовки в потрібному асортименті і при цьому забезпечує мінімальні витрати матеріалу, є типовою задачею лінійного програмування. Істотний внесок у розробку теорії і методів вирішення задач раціонального розкрою внесли американські вчені Гілмор і Гомори [3], які займалися вивченням розкрою на підприємствах з виробництва паперу та скла в першій половині 60-х років. Розв'язку задач раціонального розкрою присвячені монографії [4, 5].

Питання класифікації задач раціонального розкрою і пакування, були розглянуті в [6 – 8]. В роботі [9] приведений огляд методів розв'язування класичних задач розкрою-пакування.

Задача раціонального розкрою відноситься до класу NP-повних дискретних оптимізаційних задач комбінаторного типу. Слід розрізнити наближені і точні методи розв'язку задач дискретної оптимізації. До наближених методів, в свою чергу, відносять евристики і метаевристики [8].

Розробка точних методів побудови оптимальних планів розкрою ведеться досить давно. Поширені підходи передбачають використання методу відсікання для розв'язку відповідних задач цілочисельного лінійного програмування або реалізацію ефективних переборних алгоритмів на основі загальної схеми методу гілок і меж [9, 10]. Складність цих методів зростає експоненційно при зростанні розмірності задачі.

Евристичні методи не гарантують отримання оптимальних рішень, але при цьому відрізняються порівняльною простотою і дозволяють при незначних витратах отримувати рішення, прийнятні для практичного використання. Евристичні методи, використовувані для розв'язання задач раціонального розкрою, умовно можна поділити на дві групи. Методи першої групи ґрунтуються на розв'язанні допоміжної задачі лінійного програмування. Отримане рішення розкрійної задачі не є цілочисельним і потребує відповідної корекції. У методах другої групи застосовується інший підхід, який передбачає покрокову побудову допустимого розв'язку за кінцеве число ітерацій [11].

Метаевристичні методи набули широкої популярності відносно недавно і стрімко еволюціонували від простих концепцій до складних ієрархічних моделей, які відтворюють організацію і поведінку об'єктів живої і неживої природи, в тому числі і людини. Узагальнена структура довільного метаевристичного методу передбачає наявність

інтелектуальної стратегії, яка керує проблемно-орієнтованою евристикою нижнього рівня і запобігає збіжність до локальних екстремумів. Прикладами метаевристик є – імітація відпалу, пошук із заборонами, різні види еволюційних алгоритмів, метод мурашиної колонії і т. і. Ефективність метаевристичних методів у розв'язанні задач раціонального розкрою підтверджена безліччю успішних досліджень [12].

В роботі для задач лінійного розкрою використовується новий метод точної квадратичної регуляризації (EQR) [13], який є ефективним для розв'язку задач розкрою великої розмірності.

Мета роботи – адаптувати метод точної квадратичної регуляризації для розв'язку задач лінійного розкрою. Цей метод показав значні переваги над існуючими методами пошуку глобального екстремуму для неперервних задач оптимізації [2].

Постановка задачі лінійного розкрою матеріалів передбачає: маються вихідні заготівлі заданого розміру L , які необхідно розкромити на m заготівель заданої довжини q_1, q_2, \dots, q_m . Відома потреба b_1, b_2, \dots, b_m в заготівлях відповідної довжини. Для математичної постановки задачі необхідно визначити технологічну матрицю варіантів розкрою ("карта розкрою") вихідної заготівлі на заготівлі заданої довжини. Дана матриця породжує матрицю A , де елемент a_{ij} означає кількість заготівель i -го виду при j -тої технології розкрою. Пов'язуємо з кожною технологією позитивну цілу змінну x_i , яка показує скільки раз i -та технологія розкрою використовувалась. Для кожної технології розкрою визначим вектор залишків c . Тоді задача оптимального розкрою полягає в наступному:

Знайти

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n c_i x_i \mid \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \geq b_j, \forall j = 1, \dots, m, x_i \geq 0, \text{цілі} \right\}, \quad (1)$$

що дозволяє мінімізувати залишки розкрою.

Як було сказано раніше, математичною моделлю задач розкрою є оптимізаційні задачі з цілочисельними змінними. Такі задачі складні для чисельного розв'язку. Найчастіше використовується метод гілок і меж, складність якого зростає експоненціально при збільшенні розмірності задачі. В даній роботі для розв'язку задач лінійного розкрою було запропоновано новий метод точної квадратичної регуляризації (EQR) [13].

Перетворимо дискретну задачу (1) до неперервної

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n c_i x_i \mid \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \geq b_j, \forall j = 1, \dots, m, x_i \geq 0, \sum_{i=1}^n (1 - \cos(2\pi x_i)) \leq 0 \right\}, \quad (2)$$

де доданому обмеженню задовольняють тільки цілі значення x_i .

Використаємо точну квадратичну регуляризацію для перетворення задачі (2) до вигляду [12]:

$$\begin{aligned} \max \{ & \|z\|^2 \mid \sum_{i=1}^n c_i x_i + s + (r-1)\|z\|^2 \leq d, \\ & \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \geq b_j, \forall j = 1, \dots, m, \\ & x_i \geq 0, \sum_{i=1}^n (1 - \cos(2\pi x_i)) + r\|z\|^2 \leq d \}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $z = (x, x_{n+1})$.

Задача (3) містить нову змінну d , та два нових параметра s, r . Для того, щоб допустима множина задачі (3) була опуклою достатньо визначити $r \geq 40$.

Параметр s визначаємо з нерівності

$$s \geq \|x^*\| - \sum_{i=1}^n c_i x_i^*,$$

де x^* – розв’язок задачі (1).

Розв’язок задачі (3) виконується в 3 етапи.

На першому етапі знаходимо початкове значення d з розв’язку опуклої задачі:

$$\begin{aligned} \max \{ & d \mid \sum_{i=1}^n c_i x_i + s + (r-1)\|z\|^2 \leq d, \\ & \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \geq b_j, \forall j = 1, \dots, m, \\ & x_i \geq 0, \sum_{i=1}^n (1 - \cos(2\pi x_i)) + r\|z\|^2 \leq d \}, \end{aligned}$$

яка ефективно розв’язується методом локальної оптимізації, наприклад, прямо-двоїтим методом внутрішньої точки [14]. Якщо для розв’язку

$(z^* d^*)$, даної задачі виконується умова $r\|z^*\|^2 = d^*$, то її розв'язок співпадає з розв'язком задачі (2).

На другому етапі в задачі (3) необхідно знайти мінімальне значення d , для якого виконується умова

$$r \sum_{i=1}^{n+1} z_i^2 = d. \quad (4)$$

Для цього використовуємо метод дихотомії, змінюючи значення d , з певним кроком, та розв'язуючи для кожного фіксованого d задачу (3). При збільшенні d ліва частина виразу (4) буде монотонно збільшуватись до виконання рівності. Крок зміни значення d може бути різним для кожної ітерації. Його слід вибирати в залежності від швидкості спадання цільової функції задачі (2) та ступеня наближеності до рівності (4).

На третьому етапі розв'язуємо задачу (2), в якості вихідних даних використовуючи знайдені x_i на попередньому етапі.

Таким чином, суть методу EQR полягає в наступному:

– використовується точна квадратична регуляризація для перетворення задачі (1) до задачі максимуму норми вектора на опуклій множині (3);

– в задачі (3) знаходиться мінімальне значення змінної d методом дихотомії. Для кожного фіксованого значення d розв'язується задача (3) прямо-двоїтим методом внутрішньої точки. Метод дихотомії завершує роботу при виконанні умови (4) з заданою точністю. Для знайденого значення d розв'язок задачі (3) співпадає з розв'язком задачі (1).

Теоретичне обґрунтування методу EQR приведено в роботі [14].

Розглянемо приклади задач лінійного розкрою.

Приклад 1. Маємо вихідну заготовлю довжиною 12 м. Необхідно виконати замовлення: потрібно розкроїти вихідну заготовлю на деталі довжиною 2 м в кількості 101 штуки, 3 м в кількості 100 штук, 4 м в кількості 75 штук с мінімальною кількістю відходів.

Таким чином, маємо: $L = 12$; $m = 3$; $q_1 = 2$, $q_2 = 3$, $q_3 = 4$; $b_1 = 101$, $b_2 = 100$, $b_3 = 75$.

Карта розкрою (технологічна матриця варіантів розкрою) відображена в табл. 1, де мається 10 варіантів розкрою, тобто $n = 10$. З кожною технологією розкрою пов'яжемо позитивну цілу змінну x_i , $i = \overline{1, n}$. Останній рядок таблиці 1 відображає відходи при використанні відповідної технології.

Таблиця 1

Технологічна матриця варіантів розкрою

	Технології розкрою									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4
	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
	2	2	2	2	4	3	3	4	4	4
	2	2	2	3	4	3	3	2	0	0
	2	3	4	3	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c_i	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0

Дана карта породжує матрицю A , яку відобразимо в табл. 2.

Таблиця 2

Кількість заготовівель i -го виду, при j -тої технології розкрою

	Технології розкрою									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
2 м	6	4	4	3	2	1	0	1	0	0
3 м	0	1	0	2	0	3	4	2	1	0
4 м	0	0	1	0	2	0	0	1	2	3

Розв'язок задачі, з використанням точної квадратичної регуляризації, представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Варіанти розв'язку задачі

	Технології розкрою										Кількість заготовівель	Відходи
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}		
1	4	0	5	1	3	0	0	48	2	4	67	2
2	5	0	3	0	5	2	0	47	0	5	67	2
3	0	0	5	3	13	2	0	44	0	0	67	2
4	2	0	8	0	4	0	0	49	2	2	67	2
5	1	0	10	0	3	2	0	47	0	4	67	2
6	6	0	0	0	9	0	1	48	0	3	67	1
7	1	2	4	0	11	0	1	49	0	0	68	3
8	1	2	4	0	12	0	1	47	0	0	67	3
9	0	0	0	20	7	0	1	28	0	0	67	1

З табл. 3 видно, що серед дев'яти варіантів розв'язку задачі шостий та дев'ятий варіанти – самі найкращі, тому що для них найменша

кількість заготівель використовується для розкрою з найменшими відходами.

Розв'язок цієї задачі методом розгалужень та границь протягом 60 хвилин за допомогою надбудови "Пошук рішень" дав значення цільової функції рівне 19, яке далеке від оптимального.

Приклад 2. Маємо вихідну заготівлю довжиною 20 м. Необхідно виконати розкрій: потрібно розкроїти вихідну заготівлю на деталі довжиною 2 м в кількості 300 штуки, 3 м в кількості 240 штук, 4 м в кількості 165 штук з мінімальною кількістю відходів.

Таким чином, маємо: $L = 20$; $m = 3$; $q_1 = 2$, $q_2 = 3$, $q_3 = 4$; $b_1 = 307$, $b_2 = 240$, $b_3 = 165$.

Карта розкрою (технологічна матриця варіантів розкрою) відображена в табл. 4, де є 21 варіант розкрою, тобто $n = 21$.

Таблиця 4

Технологічна матриця варіантів розкрою

	Технології розкрою																				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	3	3	3	4	4
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4	4
5	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	3	3	3	3	4	4	3	4	4	4	4
6	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	3	4	3	3	4	4	3	4	4	0	0
7	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	3	4	0	0	3	0	0	0	0
8	2	2	2	3	4	3	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	2	3	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c_i	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0

В табл. 5 відображена матриця A , яку отримали на основі карти розкрою, представленої в табл. 4.

Таблиця 5

Кількість заготівель i -го виду при j -тої технології розкрою

	Технології розкрою																				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}
2 м	10	8	8	7	6	5	5	4	4	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1	0	0
3 м	0	1	0	2	1	3	2	4	1	0	3	2	5	4	1	0	6	3	2	1	0
4 м	0	0	1	0	1	0	1	0	2	3	1	2	0	1	3	4	0	2	3	4	5

Розв'язок задачі, з використанням точної квадратичної регуляризації, представлено в табл. 6.

Таблиця 6

Розв'язок задачі

Технології розкрою																					Кількість заготівель	Відходи
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}		
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	33	100	0

З табл. 6 видно, що отриманий розв'язок задачі представляє варіанти розкрою з найменшою кількістю заготівель та з відходами, що дорівнюють 3-м додатковим заготівлям довжиною 2 м. Розв'язок цієї задачі методом розгалужень та границь після 60 хвилин розрахунку надбудовою "Пошук рішень" було перервано та отримано розкрий з відходами, що дорівнюють 16.

Висновки. Для розв'язку задач лінійного розкрою побудована математична оптимізаційна модель. Адаптовано метод EQR для розв'язку цього класу задач. Проведені обчислювальні експерименти для задач лінійного розкрою засвідчили перевагу методу EQR над методом розгалужень та границь, як по часу так і по точності розв'язку. Приведені приклади це підтверджують. Метод EQR може бути застосовано для розв'язку задач лінійного розкрою великої розмірності, адже він використовує тільки перетворення простору, ефективний прямо-двоїтий метод внутрішньої точки та метод дихотомії.

Список літератури: 1. Брейман А.Д. Рациональная организация данных аналитического компонента в индивидуальных информационных системах с использованием алгоритма упаковки с динамической внутренней границей объема / А.Д. Брейман, М.В. Ульянов // Справочник. Инженерный журнал. – № 12. – 2004. – С. 17-22. 2. Канторович Л.В. Рациональный раскрой промышленных материалов / Л.В. Канторович, В.А. Залгаллер // Изд. 3-е, испр. и доп. СПб.: Невский Диалект, 2012. – 303 с. 3. Gilmore P.C. A linear programming approach to cutting-stock problem / P.C. Gilmore, R.E. Gomory // Operations Research. – 1961. – Vol. 9, № 6. – P. 849-859. 4. Стоян Ю.Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю.Г. Стоян, С.В. Яковлев. – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с. 5. Мухачева Э.А. Рациональный раскрой промышленных материалов: Применение АСУ / Э.А. Мухачева. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с. 6. Dyckhoff H. Cutting and packing in production and distribution: A typology and bibliography / H. Dyckhoff, U. Finke. – Heidelberg: Physica-Verlag, 1992. – 248 p. 7. Wascher G. An improved typology of cutting and packing problems / G. Wascher, H. Haussner, H. Schumann // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 183. – № 3. – P. 1109–1130. 8. Валиахметова Ю.И. Теория оптимального использования ресурсов Л.В. Канторовича в задачах раскроя-упаковки: обзор и история развития методов решения / Ю.И. Валиахметова, А.С. Филиппова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – № 1 (62). – Том. 18 – С. 186-197. 9. Балабанов В.Н. Многокритериальная задача рационального планирования продольного раскроя рулонного материала / В.Н. Балабанов // Проблемы информационных технологий. – 2009. – № 2 (006). – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Pit/2009_2/Balab.htm/ – 17.11.2016. – Назва з

екрану. **10.** *Belov G.* A cutting plane algorithm for the one-dimensional cutting stock problem with multiple stock lengths / *G. Belov, G. Scheithauer* // *European Journal of Operational Research*. – 2002. – Vol. 141. – № 2. – P. 274-294. **11.** *Fekete S.P.* An exact algorithm for higher-dimensional orthogonal packing / *S.P. Fekete, J. Schepers, J.C. van der Veen* // *Operations Research*. – 2007. – Vol. 55. – № 3. – P. 569-587. **12.** *Poldi K.C.* Heuristics for the one-dimensional cutting stock problem with limited multiple stock lengths / *K.C. Poldi, M.N. Arenales* // *Computers & Operations Research*. – 2009. – Vol. 36. – № 6. – P. 2074-2081. **13.** *Nocedal J.* Numerical optimization / *J. Nocedal, S.J. Wright*. – Springer, 2006. – 685 p. **14.** *Косолап А.И.* Глобальная оптимизация. Метод точной квадратичной регуляризации / *А.И. Косолап*. – Днепропетровск: ПГАСА, 2015. – 164 с.

References:

1. Brejman, A. and Ul'janov, M. (2004), "The rational organization of the data of the analytical component in the individual information systems with the use of an algorithm with dynamic packaging internal volume abroad", *Directory. Engineering magazine*, No 12, pp. 17-22.
2. Kantorovich, L.V. and Zalgaller, V.A. (2012), *A rational cutting of industrial materials, Edition 3, revised and enlarged*, Nevskij Dialekt, Saint Peterburg, 303 p.
3. Gilmore, P.C. and Gomory, R.E. (1961), "A linear programming approach to cutting-stock problem", *Operations Research*, Vol. 9, No 6, pp. 849-859.
4. Stojan, Ju.G. and Jakovlev, S.V. (1986). *Mathematical models and optimization methods of the geometrical design*, Naukova dumka, Kiev, 268 p.
5. Muhacheva, Je.A., (1984), *A rational cutting of industrial materials: The use of ACS*, Mashinostroenie, Moscow, 176 p.
6. Dyckhoff, H. and Finke, U. (1992), *Cutting and packing in production and distribution: A typology and bibliography*, Physica-Verlag, Heidelberg, 248 p.
7. Wascher, G., Haussner H. and Schumann H. (2007), "An improved typology of cutting and packing problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, No 3, pp.1109-1130.
8. Valiahmetova, Ju.I. and Filippova, A.S. (2014), "The theory of optimal use of resources Kantorovich in cutting-packing problems: an overview and history of the development of methods for solving", *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, No 1 (62), pp. 186-197.
9. Balabanov, V.N. (2009), "Multicriteria task of rational planning of the longitudinal cutting of the web material", *The problems of information technologies*, No 2 (006). – http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/Pit/2009_2/Balab.htm/ – 17.11.2016.
10. Belov, G. and Scheithauer G. (2002), "A cutting plane algorithm for the one-dimensional cutting stock problem with multiple stock lengths", *European Journal of Operational Research*, Vol. 141, No 2, pp. 274-294.
11. Fekete, S.P., Schepers, J. and van der Veen, J.C. (2007) "An exact algorithm for higher-dimensional orthogonal packing", *Operations Research*, Vol. 55, No 3, pp. 569-587.
12. Poldi, K.C. and Arenales, M.N. (2009) "Heuristics for the one-dimensional cutting stock problem with limited multiple stock lengths", *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No 6, pp. 2074-2081.
13. Nocedal, J. and Wright, S.J. (2006), *Numerical optimization*, Springer, 685 p.
14. Kosolap A.I. (2015), *Global optimization. The method of exact quadratic regularization*, PGASA, Dnepropetrovsk, 164 p.

Статью представил д-р техн. наук, профессор НТУ "ХПИ" Серков А.А.

Надійшла (received) 06.12.2016

Kosolap Anatolii, Dr.Ph.-m.Sc., Professor,
The Ukrainian State Chemical-Technological University
Ave Gagarin, 8, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005
e-mail: anivkos@ua.fm.

Kodola Galina, Lecturer
The Ukrainian State Chemical-Technological University
Ave Gagarin, 8, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005
Tel.: (067) 636 34 94; e-mail: gkodola@gmail.com

УДК 519.85

Оптимізація в задачах лінійного розкрою матеріалів / Косолап А.І., Кодола Г.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 56 – 66.

В статті розглянута класична задача лінійного розкрою, яка є NP-складною. Для розв'язку даного класу задач пропонується метод точної квадратичної регуляризації (EQR), який є ефективним для розв'язання задач неперервної оптимізації великої розмірності. Проведені обчислювальні експерименти для задач лінійного розкрою засвідчили перевагу методу EQR над методом розгалужень та границь, як по часу так і по точності розв'язку. Приведені приклади це підтверджують. Табл.: 6. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: лінійний розкрій, оптимізація, метод точної квадратичної регуляризації.

УДК 519.85

Оптимизация в задачах линейного раскроя материалов / Косолап А.И., Кодола Г.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 56 – 66.

В статье рассмотрена классическая задача линейного раскроя, которая является NP-сложной. Для решения данного класса задач предлагается метод точной квадратичной регуляризации (EQR), который является эффективным для решения задач непрерывной оптимизации большой размерности. Проведенные вычислительные эксперименты для задач линейного раскроя показали преимущество метода EQR над методом ветвей и границ, как по времени так и по точности решения. Приведенные примеры это подтверждают. Табл.: 6. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: линейный раскрой, оптимизация, метод точной квадратичной регуляризации.

UDC 519.85

Optimization problems of linear cutting materials / Kosolap A.I., Kodola G.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (1216). – P. 56 – 66.

In the article the classic problem of linear cutting, which is NP-difficult. For solving this class of problems a method for accurate quadratic regularization (EQR), which is effective for solving problems of continuous optimization of large dimensions. Conducted computing experiments for problems of linear cutting method showed superiority over EQR by branch and bound, both in time and the accuracy of the interpretation. The examples confirm this. Tabl. 6. Refs.: 14 titles.

Keywords: linear cutting, optimization, method accurate quadratic regularization.

В.Д. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Одесса,

С.В. ПАВЛЕНКО, м.н.с., ОНПУ, Одесса,

Д.Ю. РОМАНОВ, студ., ОНПУ, Одесса

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯРИЗОВАННОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Исследуется точность и помехоустойчивость метода детерминированной идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра, основанного на дифференцировании откликов по параметру–амплитуде тестовых сигналов. Вычисление производных сводится к решению соответствующих линейных интегральных уравнений Вольтерра I рода. Вычислительная устойчивость метода идентификации обеспечивается применением метода регуляризации некорректных задач А.Н. Тихонова. Для сглаживания оценок ядер Вольтерра используется вейвлет–фильтрация. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: детерминированная идентификация, нелинейные динамические системы, ядра Вольтерра, регуляризация, вейвлет–фильтрация.

Постановка проблемы и анализ литературы. Для моделирования нелинейных динамических систем (НДС) применяются интегро–степенные ряды Вольтерра (РВ) [1 – 3]. При этом нелинейные и динамические свойства системы полностью характеризуются последовательностью инвариантных относительно вида входного сигнала многомерных весовых функций – ядер Вольтерра (ЯВ). Задача идентификации НДС – построения модели в виде РВ – заключается в определении ЯВ на основе данных экспериментальных исследований системы "вход–выход".

Идентификация по своей сути относится к обратным задачам, при решении которых возникают трудности вычислительного плана, обусловленные некорректностью постановки задачи. Получаемые решения оказываются неустойчивыми к погрешностям исходных данных – ошибкам измерений откликов идентифицируемой системы [4, 5]. Кроме того, при использовании моделей в виде РВ возникает задача разделения отклика исследуемой НДС на парциальные составляющие (ПС), соответствующие отдельным членам РВ, поскольку измеряется суммарный отклик на тестовый сигнал [2]. Известные экспериментальные методы оценки ЯВ во временной области, основанные на применении пробных импульсных (ступенчатых) сигналов [6, 7], характеризуется малым временем измерения, простотой

обработки информации и генерирования тестового сигнала. Однако, низкая помехоустойчивость методов детерминированной идентификации ограничивает их применение в реальных условиях при наличии погрешностей измерений откликов, полученных в результате экспериментальных исследований "вход–выход" идентифицируемой НДС [2, 8]. Это обуславливает необходимость разработки новых методов идентификации НДС, с использованием детерминированных пробных воздействий, основанных на применении алгоритмов регуляризации некорректных задач [5, 8, 9] и шумоподавления (сглаживания) с помощью вейвлет–преобразований [10].

Целью работы является анализ точности и вычислительной устойчивости интерполяционного метода идентификации НДС в виде ЯВ с использованием импульсных тестовых сигналов, основанного на выделении ПС с помощью процедуры дифференцирования откликов по параметру – амплитуде тестовых сигналов [11, 12].

Метод идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра. Для непрерывной НДС связь между входным $x(t)$ и выходным $y(t)$ сигналами при нулевых начальных условиях может быть представлена РВ

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i, \quad (1)$$

где $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – ЯВ n -го порядка, функция симметричная относительно вещественных переменных τ_1, \dots, τ_n ; $y_n(t)$ – n -я ПС отклика НДС (n -мерный интеграл свертки); t – текущее время.

Отклик модели НДС в момент времени t в виде РВ на воздействие $ax(t)$:

$$\begin{aligned} y(t) &= y[ax(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} y_n[ax(t)] = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} a^n \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где a – произвольное вещественное число, причем $0 < |a| \leq 1$. Тогда n -я ПС отклика НДС находится по формуле

$$n! \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i = y_a^{(n)}[ax(t)]_{a=0}. \quad (3)$$

При тестовых импульсных воздействиях длительностью $\Delta\tau$ оценка диагонального сечения ЯВ n -порядка вычисляется по формуле [11]

$$\hat{w}_n(t, t, \dots, t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{(\Delta\tau)^n}, \quad (4)$$

где $\hat{w}_n(t, t, \dots, t)$ – оценка диагонального сечения ЯВ n -го порядка; $\hat{y}_n(t)$ – оценка n -й ПС отклика НДС на одиночный импульс в момент времени t , полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3).

Оценка поддиагонального сечения ЯВ n -го порядка определяется как

$$\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{1}{n!(\Delta\tau)^n} \sum_{\delta_1, \dots, \delta_n=0}^{n+\sum_{i=1}^n \delta_i} (-1)^{\sum_{i=1}^n \delta_i} \hat{y}_n(t, \delta_1, \dots, \delta_n), \quad (5)$$

где $\hat{y}_n(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$ – оценка n -й ПС отклика НДС в момент времени t , полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3), при действии на входе нерегулярной последовательности импульсов с площадью $\Delta\tau\Delta a$; если $\delta_i = 1$, то на входе НДС в момент времени τ_i есть импульс, при $\delta_i = 0$ – импульс отсутствует.

При такой обработке выходных сигналов идентифицируемой НДС методическая ошибка становится близкой к нулю, но при этом значительно увеличивается погрешность, возникающая за счет ошибок округления вычислений.

Задача нахождения производной n -го порядка $z(a)$ от функции $y(a)$, для которой $y(0) = y'(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0$, сводится к решению интегрального уравнения Вольтерра первого рода [5] относительно $z(\xi)$

$$\int_0^a \frac{1}{(n-1)!} (a - \xi)^{n-1} z(\xi) d\xi = y(a), \quad (6)$$

и характеризуется отсутствием устойчивости решения к малым изменениям правой части уравнения $y(a)$. Для нахождения приближенного решения уравнения (6), устойчивого к погрешностям исходных данных, применяется метод регуляризации некорректных задач [4, 5].

Для реализации алгоритма идентификации (4) и (5) перейдем к дискретному аналогу задачи нахождения регуляризованных приближенных решений уравнения (6). Измерим отклики НДС на множестве пробных импульсных воздействий, у которых амплитуда импульсов a изменяется дискретно на интервале $|a| \leq a_{\max}$ с шагом Δa .

Затем каждое сечение по времени t полученного множества откликов $y(a_j, t, \delta_1, \dots, \delta_n) = y(j\Delta a)$, где $a_j = j\Delta a$, $j = 1, 2, \dots, L$ (L – число уровней дискретизации по амплитуде a) подвергается операции n -кратного численного дифференцирования по a , которая сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\sum_{i=1}^j \frac{\Delta a}{(n-1)!} (j\Delta a - \xi_i)^{n-1} z(\xi_i) = u(j\Delta a), \quad (7)$$

где $a \in (0, a_{\max}]$, $a_{\max} = L\Delta a$, $\xi_i = i\Delta a$, $u(a) = \sigma(a)y(a)$; $\sigma(a)$ – некоторая функция, для которой выполняются условия:

$$\begin{aligned} \sigma(0) = \sigma'(0) = \dots = \sigma^{(n)}(0) = 0, \quad \sigma(a_{\max}/2) = 1/2, \quad \sigma(a_{\max}) = 1, \\ \sigma'(a_{\max}) = \dots = \sigma^{(n)}(a_{\max}) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В качестве функции $\sigma(a)$ можно выбрать, например, сигмоидальную функцию

$$\sigma(a) = \frac{1}{1 + \exp(-a + a_{\max}/2)}. \quad (9)$$

Систему уравнений (7) можно записать в векторно–матричной форме

$$\mathbf{A}_n \mathbf{z} = \mathbf{u}, \quad (10)$$

где $\mathbf{A}_n = \|\alpha_{ij}\|_{i,j=1,L}$, $\alpha_{ij} = \frac{(j-i+1/2)^{n-1} (\Delta a)^n}{(n-1)!}$ для $i \leq j$, $\alpha_{ij} = 0$ для $i > j$; $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_L)'$, $z_i = z(i\Delta a - \Delta a/2)$; $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_L)'$, $u_j = u(j\Delta a) = \sigma(j\Delta a)y(j\Delta a)$.

При $n = 1, 2$ и 3 матрицы \mathbf{A}_n соответственно имеют вид:

$$\mathbf{A}_1 = \Delta a \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \dots 1 \\ 0 & 1 & 1 \dots 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \dots 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \frac{(\Delta a)^2}{2} \begin{vmatrix} 1 & 3 & 5 \dots (2L-1) \\ 0 & 1 & 3 \dots (2L-3) \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \dots 1 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \left(\frac{\Delta a}{2} \right)^3 \begin{vmatrix} 1 & 3^2 & 5^2 & \dots & (2L-1)^2 \\ 0 & 1 & 3^2 & \dots & (2L-3)^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

Решение поставленной задачи находится на середине интервала $[0, 2a_{\max}]$, т.е. в точках $\xi_i = (i - 0,5)\Delta a$.

Таким образом, вычислительный алгоритм, реализующий метод идентификации многомерных ЯВ на основе соотношений (7) – (9), сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (10) для каждого фиксированного момента времени t на интервале $[0, T]$, где T – время моделирования.

Поскольку решение интегрального уравнения (10) – функция $z(a)$, представляет собой производную n -го порядка от функции в правой части уравнения (т.е. с учетом произведенных преобразований – функции $u(a) = \sigma(a)y(a)$), то приближенное значение искомой n -ой производной функции $y(a)$ в точке $a = 0$ находится как

$$y^{(n)}(0) \approx \frac{u^{(n)}(0)}{\sigma(0)} = 2u^{(n)}(0). \quad (11)$$

Регуляризация процедуры идентификации. Для обеспечения вычислительной устойчивости процедуры идентификации воспользуемся одним из вариантов метода регуляризации А.Н. Тихонова [5], основанном на вариационном способе построения регуляризирующего оператора. Этот метод сводится к нахождению приближенного вектора решения \mathbf{z}^α , минимизирующего некоторый сглаживающий функционал.

Единственный вектор, удовлетворяющий условию минимума сглаживающего функционала, может быть определен из решения СЛАУ

$$(\mathbf{A}^* \mathbf{A} + \alpha \mathbf{I}) \mathbf{z}^\alpha = \mathbf{A}^* \mathbf{u}, \quad (12)$$

где \mathbf{A}^* – матрица сопряженная к \mathbf{A} , \mathbf{I} – единичная матрица, α – параметр регуляризации.

Для выбора значения параметра α используется критерий невязки [5]:

$$\|\mathbf{A}\mathbf{z} - \mathbf{u}\| < \varepsilon, \quad (13)$$

где ε – заданная погрешность решения; $\|\cdot\|$ – норма в векторном пространстве.

Приближенное решение, получаемое на основе (12) и (13), соответствует нулевому порядку регуляризации. Для повышения

гладкости решений используется регуляризационная матрица \mathbf{R} и находится решение СЛАУ при значении параметра α , которое обеспечивает выполнение условия (12)

$$(\mathbf{A}^* \mathbf{A} + \alpha \mathbf{R}) \mathbf{z}^\alpha = \mathbf{A}^* \mathbf{u}. \quad (14)$$

Регуляризационная матрица \mathbf{R} имеет ленточную структуру, диагональные элементы которой равны $r_{ii} = 1 - (\Delta a)^{-2}$, а элементы в над- и поддиагонали равны $r_{ij} = -(\Delta a)^{-2}$, $i \neq j$; $i, j = \overline{1, L}$ (первый порядок регуляризации) [6].

Компьютерное моделирование. Для исследования метода идентификации в качестве тестового выбран объект, который описывается нелинейным дифференциальным уравнением Рикатти:

$$y'(t) + \lambda y(t) + \beta y^2(t) = x(t),$$

где λ и β – постоянные коэффициенты.

Для этого объекта известны аналитические выражения для ЯВ первого, второго и третьего порядков [10], которые используются в качестве эталонов при исследовании потенциальной точности и вычислительной устойчивости рассматриваемого метода идентификации. Исследования осуществлялись с помощью компьютерного моделирования в среде Matlab–Simulink при следующих значениях параметров тестовых импульсных сигналов: $\Delta \tau = 0,01$, $a_{\max} = 100$.

На рис. 1 представлены результаты идентификации тестового объекта без применения регуляризации при точных измерениях откликов – оценки ЯВ 1-го порядка $w_1(t)$ (рис. 1, а) и диагонального сечения ЯВ 2-го порядка $w_2(t, t)$ (рис. 1, б) при различных экспериментах с шагом по амплитуде Δa , последовательно принимающим значения из множества (25; 20; 12,5; 10; 5). При этом количество экспериментов L равно 4, 10, 16, 20 и 40, соответственно. Наилучшие результаты идентификации получены при $\Delta a = 5$ ($L = 40$).

Оценки диагонального сечения ЯВ 2-го порядка $w_2(t, t)$ при погрешности измерений 1% на основе решения СЛАУ (10) для $\Delta a = 4$ ($L = 50$) без регуляризации представлены на рис. 2, а. Полученные при этом большие ошибки не приемлемы на практике (процентная нормированная среднеквадратичная ошибка (ПНСКО) составляет 244,2%). На рис. 2, б приведены оценки $w_2(t, t)$, полученные с помощью метода регуляризации [5] и сглаживания с использованием вейвлет-преобразования [10]. При этом ПНСКО идентификации составляет 2,95%.

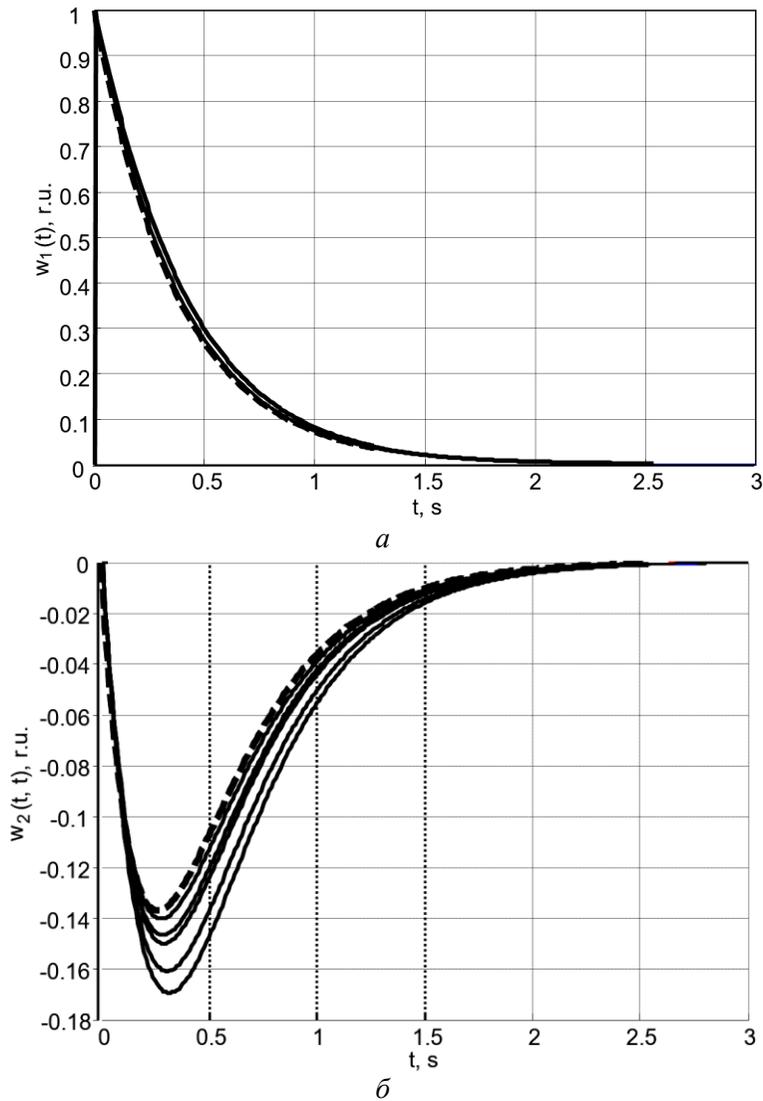
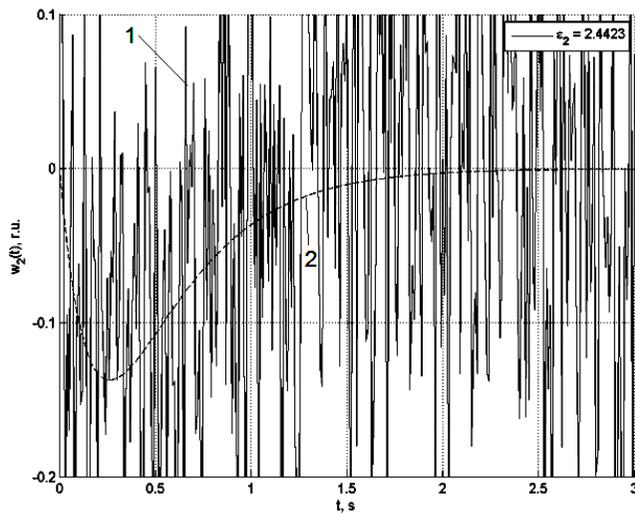
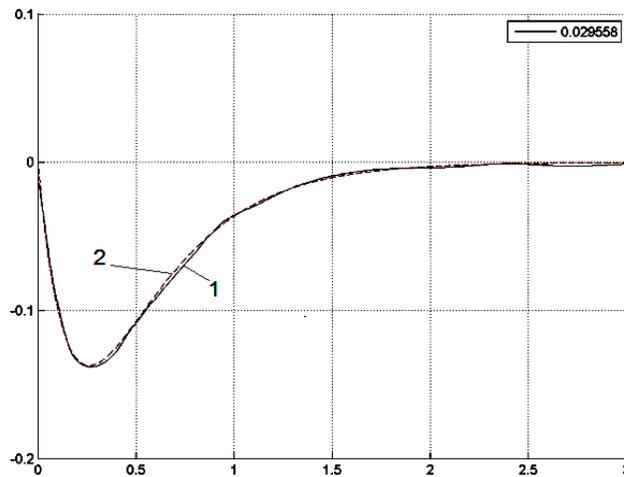


Рис. 1. Результаты идентификации тестового объекта без регуляризации при точных измерениях откликов: *a* – оценки ЯВ 1-го порядка, и *б* – диагонального сечения ЯВ 2-го порядка. Пунктирная линия – эталонные значения

В таблице на основе вычислительных экспериментов выполнено сравнение по величине погрешности предложенного метода идентификации и интерполяционного метода [11]. Анализ данных таблицы показывает, что предложенный метод позволяет существенно повысить точность идентификации.



a



б

Рис. 1. Оценки диагонального сечения ЯВ 2-го порядка тестового объекта $w_2(t, t)$ при погрешностях измерений 1% на основе решения СЛАУ (10) без регуляризации (*a*) и полученные с помощью метода регуляризации и сглаживания с использованием вейвлет-фильтрации при $\Delta a = 4$, $L = 50$ (*б*).
Пунктирная линия – эталонные значения

Результаты сравнения регуляризованного метода идентификации на основе решения СЛАУ (10) [13] и интерполяционного метода [11], где для численного дифференцирования используются формулы в конечных разностях и применяется естественная регуляризация – оптимизация

шага по амплитуде тестовых импульсов, для ядра второго порядка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов идентификации на примере оценки ядра второго порядка $w_2(t,t)$ тестовой НДС

Метод идентификации	Минимальные ПНСКО ε_n , % при погрешности измерений σ , %			
	Применение регуляризации		Применение вейвлет-фильтрации	
	$\sigma = 1$	$\sigma = 3$	$\sigma = 1$	$\sigma = 3$
Идентификация на основе решения СЛАУ (10) [13], $L=50$	6,7	18,4	2,83	5,85
Идентификация на основе интерполяционного метода [11]	13,0	26,3	10,9	15,5

Выводы. Полученные результаты исследований точности регуляризованного метода идентификации нелинейных систем [13], основанного на решении СЛАУ (10) показывают, что при уменьшении шага по амплитуде тестовых импульсов (увеличении количества экспериментов) оценки ядер $w_1(t)$, $w_2(t,t)$ сходятся к эталонным значениям тестовой НДС. При измерениях откликов с погрешностью получаемые оценки ПНСКО идентификации для ядра второго порядка $w_2(t,t)$ в 2 раза меньше, чем минимальная ПНСКО при применении интерполяционного метода. Так как в регуляризованном методе идентификации может использоваться практически неограниченное сверху число экспериментов, это дает возможность повысить точность вычисления производных, а, следовательно, и точность идентификации.

Список литературы: 1. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Н.П. Петров, Б.Л. Шмульян – М.: Энергия, 1976. – 440 с. 2. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егунов. – Учебник для ВУЗов. Т. 2, 2-е изд. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 638 с. 3. Doyle F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, B.A. Ogunnaike – Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. – 314 p. 4. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. 288 с. 5. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов и др. – М.: Наука, 1983. – 200 с. 6. Giannakis G.B. A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering / G.B. Giannakis, E. Serpedin // Signal Processing – EURASIP, Elsevier Science B.V., 2001. – Vol. 81. – №. 3. – P. 533-580. 7. Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review / C.M. Cheng, Z.K. Peng, W.M. Zhang,

G. Meng // *Mechanical Systems and Signal Processing* – November, 2016. – P. 1-25. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.10.029> (<https://www.researchgate.net/publication/309724868>)

8. Апарцин А.С. К исследованию устойчивости решения полиномиального уравнения Вольтерра I рода / А.С. Апарцин // *Автоматика и телемеханика*. – 2011. – № 6. – С. 95-102.

9. Апарцин А.С. О повышении точности моделирования нелинейных динамических систем полиномами Вольтерры / А.С. Апарцин // *Электронное моделирование*. – 2001. – Т. 23. – № 6. – С. 3-12.

10. Павленко С.В. Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра / С.В. Павленко // *Вост.-европ. журн. передовых технологий*. – Харьков, 2010. – № 6/4 (48). – С. 65-70.

11. Павленко В.Д. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов / В.Д. Павленко // *Электронное моделирование*. – 2010. – Т. 32. – № 3. – С. 3-18.

12. Pavlenko V. Chapter 10: Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain / V. Pavlenko, S. Pavlenko, V. Speransky // In book: "Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing". V. Haasz and K. Madani (Eds.). – River Publishers, 2014. – P. 233-270.

13. Павленко С.В. Регуляризация процедуры идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра / С.В. Павленко, В.Д. Павленко // *Идентификация систем и задачи управления: Труды X Международной конференции SICPRO'15, Москва 26-29 января 2015 г., Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 230-238.

References:

1. Popkov, Y.S., Kiselev, O.N., Petrov, N.P., and Shmulyan, B.L. (1976), *Identification and optimization of nonlinear stochastic systems*. Energy, Moscow, 440 p.
2. Pupkov, K.A., and Egupov, N.D. (2004), *Methods of classical and modern automatic control theory. Statistical dynamics and identification of automatic control systems: Textbook for Universities*. Vol. 2, 2nd ed., N.E. Bauman MGTU, 638 p.
3. Doyle, F.J., Pearson, R.K., and Ogunnaike, B.A. (2001), *Identification and Control Using Volterra Models*. Published Springer Technology & Industrial Arts, 314 p.
4. Tikhonov, A.N., and Arsenin, V.Y. (1983), *Methods for solving ill-posed problems*. Nauka, Moscow, 288 p.
5. Tikhonov, A.N., Goncharsky, A.V., Stepanov, V.V. and oth. (1983), *Regularizing algorithms and a priori information*. Nauka, Moscow, 200 p.
6. Giannakis, G.B., and Serpedin, E. (2001), "A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering", *Signal Processing, EURASIP, Elsevier Science B.V.*, Vol. 81, No. 3, pp. 533-580.
7. Cheng, C.M., Peng, Z.K., Zhang, W.M., and Meng, G. (2016), "Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review", *Mechanical Systems and Signal Processing*, November, pp. 1-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.10.029> <https://www.researchgate.net/publication/309724868>
8. Aparcin, A.S. (2011), "The first A. C. to investigate the stability of solutions of polynomial Volterra equations of the first kind". *Automatics and telemechanics*, No. 6, pp. 95-102.
9. Aparcin, A.S. (2001), "About increase of accuracy of modeling of nonlinear dynamic systems with Volterra polynomials". *Electron. Modeling*, Vol. 23, No. 6, pp. 3-12.
10. Pavlenko, S.V. (2010), "Application of wavelet filtering in the process of identification of nonlinear systems based on Volterra models", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Kharkiv, No 6/4 (48), pp. 65-70.

11. Pavlenko, V.D. (2010), "Identification of nonlinear dynamic systems in the form of Volterra kernels on the basis of measurement data of impulse responses". *Electron. modeling*, Vol. 32, No. 3, pp. 3-18.
12. Pavlenko, V., Pavlenko, S., and Speransky, V. (2014), *Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain*. Chapter 10 In book: "Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing", V. Haasz and K. Madani (Eds.), River Publishers, pp. 233-270.
13. Pavlenko, S.V. and Pavlenko, V.D. (2015), "Regularization of an Identification Procedure of Non-linear Systems in the Form of the Volterra Models", Proceedings of the X International Conference "System Identification and Control Problems", SICPRO'15, Moscow, January 26-29, 2015. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAN, 2015. P. 230-238.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 15.08.2016

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (048) 705-8-436, e-mail: pavlenko_vitalij@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Pavlenko Sergey, Junior researcher
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (098) 289-77-83, e-mail: psv85@yandex.ru

Romanov Dmitriy, undergraduate
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (066) 677-66-96, e-mail: dimaromanov2010@gmail.com

УДК 681.5.015.52

Дослідження точності та обчислювальної стійкості регуляризованого методу ідентифікації нелінійних систем / Павленко В.Д., Павленко С.В., Романов Д.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 67 – 78.

Досліджується точність і завадостійкість методу детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді ядер Вольтерра, заснованого на диференціюванні відгуків по параметру–амплітуді тестових сигналів. Обчислення похідних зводиться до розв'язування відповідних лінійних інтегральних рівнянь Вольтерра I роду. Обчислювальна стійкість методу ідентифікації забезпечується застосуванням методу регуляризації некоректних задач А.Н.Тихонова. Для згладжування оцінок ядер Вольтерра використовується вейвлет–фільтрація. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: детермінована ідентифікація, нелінійні динамічні системи, ядра Вольтерра, регуляризація, вейвлет–фільтрація

УДК 681.5.015.52

Исследование точности и вычислительной устойчивости регуляризованного метода идентификации нелинейных систем / Павленко В.Д., Павленко С.В., Романов Д.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 67 – 78.

Исследуется точность и помехоустойчивость метода детерминированной идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра, основанного на дифференцировании откликов по параметру–амплитуде тестовых сигналов. Вычисление производных сводится к решению соответствующих линейных интегральных уравнений Вольтерра I рода. Вычислительная устойчивость метода идентификации обеспечивается применением метода регуляризации некорректных задач А.Н.Тихонова. Для сглаживания оценок ядер Вольтерра используется вейвлет–фильтрация. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: детерминированная идентификация, нелинейные динамические системы, ядра Вольтерра, регуляризация, вейвлет–фильтрация.

UDC 681.5.015.52

A study of the accuracy and computing stability of a regularized method identification of nonlinear system / Pavlenko V.D., Pavlenko S.V., Romanov D.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (1216). – P. 67 – 78.

A study the accuracy and noise immunity of a method of deterministic identification of nonlinear dynamic systems in the form of Volterra kernels based on the differentiation of the feedback parameter is the amplitude of the test signals. The calculation of derivatives is reduced to the solution of the corresponding linear integral Volterra equation of the first kind. The computational stability of the method of identification is provided by using the method of regularization of ill-posed problems A.N. Tikhonov. To smooth the estimates of the Volterra kernels used wavelet filtering. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 13 titles.

Keywords: deterministic identification, nonlinear dynamical systems, Volterra kernel, regularization, wavelet filtering.

А.А. РЕДЬКО, д-р техн. наук, проф., ХНУБА, Харьков,
А.В. ДАВИДЕНКО, асп., ХНУБА, Харьков,
С.В. ПАВЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, асс., ХНУБА, Харьков,
В.Е. КОСТЮК, канд. техн. наук, с.н.с., в.н.с., НАУ "ХАИ", Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОДОТРУБНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ДКВР (ДЕ)-10/14

Приведены результаты численного моделирования процессов течения и горения метана с кислородом в воздухе в вихревом факеле топки парового котла. Построена расчётная модель горелочного газомазутного устройства ГМГ-7 и топки двухбарабанного парового водотрубного котла ДЕ-10/14. Моделирование выполнено методом контрольного объёма. Определены структура факела, распределение скорости газов в топочном объёме и аэродинамическое сопротивление топки. Расчёты выполнены для топки парового котла с вторичным излучателем и без вторичного излучателя. Ил.: 3. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: численное моделирование, процессы течения, паровой водотрубный котёл, аэродинамическое сопротивление.

Постановка проблемы. Решение задач модернизации горелочных устройств, анализ и выбор оптимальных режимов эксплуатации топок и котлоагрегатов требуют применения современных методов математического моделирования. Процессы смесеобразования, горения, рециркуляции продуктов сгорания и габариты факела, существенно зависят от конструкции горелочных устройств, конфигурации топочного объёма и кинетики реакции горения. Нормативный метод не всегда приемлем для решения этих задач, так как требует использования эмпирических поправок при расчёте температур газов и других характеристик параметров топки. Неравномерное и неустойчивое течение топочных газов при изменении тепловой нагрузки котла вызывает образование зон с низкими скоростями течений, зон с обратными течениями, с повышенными температурами, высокими плотностями радиационных тепловых потоков.

Эффективное сгорание топлива и полнота химических реакций во многом определяется аэродинамической структурой факела. Габариты факела горения должны исключить соприкосновение с низкотемпературными поверхностями экранных труб при различных режимах эксплуатации котла. При проектировании топок котлов должно быть обеспечено условие максимального тепловосприятия при минимальном аэродинамическом сопротивлении. Поэтому для решения задач обеспечения оптимальных режимов горения топливовоздушной смеси, конвективного и радиационного теплообмена с окружающими

экранными водотрубными пучками является эффективным применение численного моделирования аэродинамики и турбулентного горения в топке.

Анализ литературы. Известны исследования процессов аэродинамики различных топочных устройств с применением методики численного моделирования [1 – 4]. Большое внимание уделено топкам жаротрубных котлов [3]. В [2, 4] показано влияние крутки газового потока на интенсивность горения, структуру факела и аэродинамические процессы в топочном объёме жаротрубного котла. В [3] приведены результаты моделирования топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 при сжигании угольного топлива. Исследования аэродинамики топок котлов проведены в работах [1 – 5]. Расчёты также выполняли согласно нормативному методу [6].

Результаты выполненных исследований указывают на сложность течений газов в топочном объёме и их зависимость от распределений температуры газов, на наличие обратных потоков рециркуляции газов, на вихревой характер течений в поперечных сечениях топки. При этом визуализация результатов моделирования в двух- и трёхмерном вариантах в любом сечении топки позволяет проанализировать структуру топочной среды. Аэродинамическое сопротивление при движении топочных газов зависит от структуры факела, распределений температуры и скорости газов в объёме топки. Конвективный теплообмен газов с экранными трубными пучками также определяется интенсивностью аэродинамических процессов при вихревом движении газов. Однако топки с вторичными излучателями требуют более тщательного проектирования и учёта суммарного аэродинамического сопротивления топки.

Цель статьи – установление связи количественных характеристик топочной среды с геометрией объёма топки котла при размещении в ней вторичных трубчатых излучателей.

Объект и методика исследования. Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10/14ГМ с горелочным устройством ГМГ-7, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225°C с абсолютным давлением 14 кгс/см², номинальной производительностью 10 т/ч.

Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса с учётом гравитации и с пренебрежением сжимаемостью [7]. Модель составляют: уравнение неразрывности, переноса импульса, энергии и химических компонентов газовой смеси, записанные в стационарной форме. Уравнения замкнуты

законом Ньютона для тензора давления, законом Фурье для теплового потока, законом Фика для потока массы, законом Клайперона – Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности k - ε Лаундера – Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена – Хертагера. Моделирование выполнено методом контрольного объёма.

Аэродинамическое сопротивление топки с реверсивным вторичным излучателем определяется по скорости закрученной струи [2, 8 – 11]:

$$\Delta p = \xi \frac{\omega_{\text{вх}}^2 \cdot \rho}{2}; \quad \omega_{\text{вх}} = \frac{V}{F} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta}, \quad (1)$$

где ρ , $\omega_{\text{вх}}$ – плотность и средняя скорость топливоздушнoй смеси на выходе из горелки; ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления; V – объёмный расход топливоздушнoй смеси через горелку; F – площадь сечения канала горелки; β – угол наклона выходной кромки лопатки относительно продольной оси канала.

Основные результаты и их анализ. Результаты численного исследования показали, что на выходе из вихревой горелки профиль аксиальной скорости имеет М-образную форму с провалом в приосевой зоне. Наблюдается снижение максимума скорости к периферии факела и образование зоны рециркуляции. Сложные траектории движения рециркулирующих газов приводят к увеличению аэродинамического сопротивления, возможности соприкосновения с низкотемпературными теплообменными поверхностями. Распределение скорости газового потока в объёме топки показано на рис. 1.

В продольно-горизонтальном сечении значение скорости на оси топки составляет 10,3 м/с, а вблизи боковых трубчатых поверхностей 2,5 м/с. В продольно-вертикальном сечении значения скорости вблизи верхнего барабана составляет 3 м/с, а вблизи нижнего барабана 3,2 м/с. Изолинии полного избыточного давления указывают на его снижение по длине топки. Общее падение давления по длине топки составляет 65 Па. На периферии факела давление потока газов снижается от 60 Па до 5 Па. Статическое давление газов по длине топки возрастает (рис. 2).

Для топки с вторичным излучателем аэродинамика газа существенно отличается.

Топка с реверсивным факелом. При размещении вторичного трубчатого излучателя с заглушенным торцом в топке, наблюдается реверсивное движение топочных газов, характерные профили скоростей и температур. В приосевой области закрученной струи появляются зоны с разрежением, что вызывает обратные токи рециркуляции.

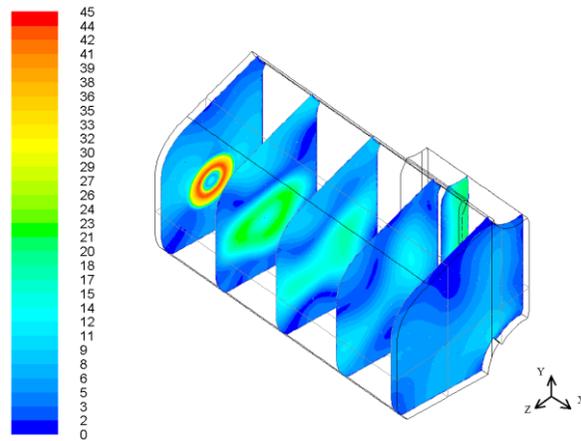


Рис. 1. Распределение скорости газового потока в объёме топки, (м/с)

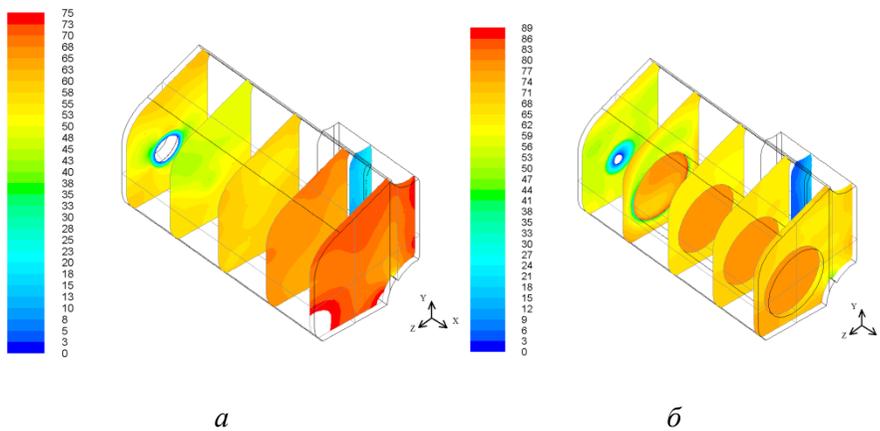


Рис. 2. Статическое давление газов по длине топки:
а – без вторичного излучателя; *б* – с вторичным излучателем

На рис. 3 показано влияние диаметра вторичного излучателя. Значения потерь давления в топке котла приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчёта потерь давления в топке котла

Наименование варианта	p , выход из амбразуры, Па	p , выход из топки, Па	Δp , Па
Без вторичного излучателя	206	65	141
С вторичным излучателем 840 мм	184	66	118
С вторичным излучателем 1260 мм	194	75	119

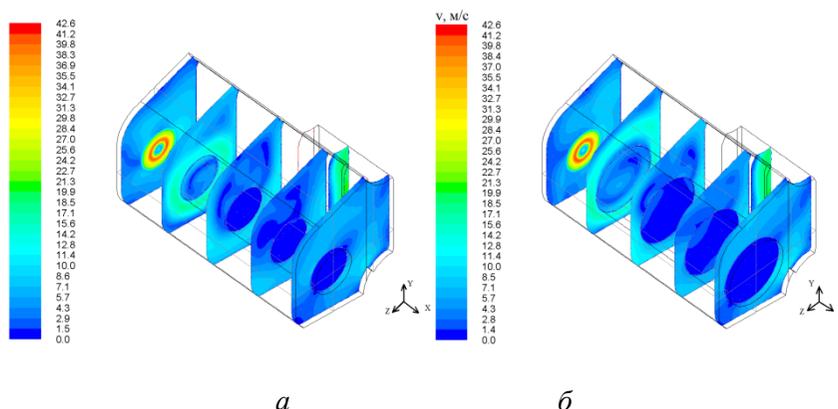


Рис. 3. Влияние диаметра вторичного трубчатого излучателя:
 а – диаметр 840 мм; б – диаметр 1260 мм.

Скорость газов внутри тупикового излучателя (рис. 3) изменяется по глубине от 5 – 10 м/с на входе до 1,5 – 2 м/с в конце излучателя. В излучателе диаметром 840 мм наблюдаются медленные возвратные течения со скоростью 3 – 8 м/с, с увеличением диаметра скорости несколько возрастают до значений 5 – 10 м/с. Газы частично обтекают вторичный излучатель. Скорость газов в зависимости от диаметра излучателя увеличивается от 3 – 7 м/с до 8 – 17 м/с.

Выводы. Результаты численного моделирования показали, что горелочное устройство ГМГ-7 обеспечивает устойчивую аэродинамическую структуру течения и вихреобразования. Размещение в объёме топки вторичных излучателей обеспечивает образование обратных течений и стабилизацию процесса горения. Увеличение диаметра излучателя влияет на распределение скорости газов в объёме топки: с увеличением диаметра излучателя скорость газов вблизи боковых экранных трубчатых поверхностей повышается до 15-17 м/с, увеличивая конвективную составляющую теплового потока.

Список литературы: 1. Басок Б.И. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла с вторичным излучателем / Б.И. Басок, В.Г. Демченко, М.П. Мартыненко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 1. – С. 17-22. 2. Хаустов С.А. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Том 323. – № 4. – С. 5-8. 3. Гиль А.В. Исследования аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Том 310. – № 1. – С. 175-181. 4. Гунта А. Закрученные потоки: пер. с англ. / А. Гунта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с. 5. Тайлашева Т. С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВР / Т.С. Тайлашева // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 3 (13). – С. 11-15. 6. Мочан Н.И.

Аэродинамический расчёт котлов. Нормативный метод / Н.И. Мочан – Л.: Изд-во Энергия, 1977. – 256 с. **7. Редько А.О.** Моделювання процесів теплообміну в топках водотрубних котлів ДКВР(ДЕ)-10/14 / А.О. Редько, А.В. Давіденко, С.В. Павловський, В.С. Костюк // Вісник НУ "Львівська політехніка". Серія: Теорія та практика будівництва. – 2016. – № 844. – С.180-187. **8. Ахмедов Р.Б.** Аэродинамика закрученной струи / Р.Б. Ахмедов Т.Б., Балагула, Ф.К. Рашидов и др. // М.: Энергия, 1977. – 240 с. **9. Warnatz J.** Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition / J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble. – Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. – 388 p. **10. Jakobsen H.A.** Chemical Reactor Modeling / H.A. Jakobsen. – Springer, 2008. – 1244 p. **11. Peters N.** Turbulent combustion / N. Peters. – Cambridge University Press, 2000. – 304 p.

References:

1. Basok, B.I., Demchenko, V.G. and Martynenko, M.P. (2006), "Numerical simulation of aerodynamic processes in the furnace of the boiler with a secondary transmitter", *Industrial heating engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 17-22.
2. Khaustov, S.A. and Zavorin, N.S. (2013), "Numerical study of aerodynamics fire-tube furnace with reversible torch", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, Vol. 323, No. 4, pp. 5-8.
3. Gil, A.V. and Zavorin, A.S. (2007), "Aerodynamics and combustion in the furnace of the boiler BKZ-420-140 with respect to the options of replacement project fuel", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, Vol. 310, No. 1, pp. 175-181.
4. Gupta, A., Lillie, D., and Sayred, N. (1987), "Twirled streams: Trans. from English", Mir, Moscow, 588 p.
5. Taylasheva, T.S. (2014), "Analysis of operating experience DKVR type boilers Siberia", *Bulletin of Science*, No. 3 (13), pp.11-15.
6. Mochan, N.I. (1977), "Aerodynamic calculation of boilers. Normative method", Publishing House Energy, Leningrad, 256 p.
7. Red'ko, A.O., Davidenko, A.V., Pavlovsky, S.V. and Kostyuk, V.E. (2016), "Modeling of heat transfer in furnaces water tube boilers DKVR (DE)-10/14", *News NU "Lviv politehnika". Series: Theory and practice of construction*, Lviv, No. 844, pp. 180-187.
8. Akhmedov, R.B., Balagula, T.B., Rashidov, F.K. and Sakaev, A.Yu.(1977), "Aerodynamics swirling stream", *Energia*, Moscow, 240 p.
9. Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006), *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Edition*, Springer Berlin Heidelberg, New York, 388 p.
10. Jakobsen, H.A. (2008), "Chemical Reactor Modeling", Springer, 1244 p.
11. Peters, N. (2000), "Turbulent combustion", Cambridge University Press, 2000. – 304 p.

Статью представил д-р техн. наук, проф. Харьковского национального университета строительства и архитектуры Редько А.Ф.

Поступила (received) 15.08.2016

Redko Andriy, Dr.Sci.Tech, Professor
Kharkiv National University of Construction and Architecture
Str. Sumskaya, 40, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (057)-700-16-40, e-mail: andrey.ua-mail@mail.ru

Davidenko Anastasiia, post-graduate student
Kharkiv National University of Construction and Architecture
Str. Sumskaya, 40, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (057)-700-16-40, e-mail: anastasiya.vyacheslavovna92@mail.ru

Pavlovskiiy Sergiy, PhD Tech., ass.
Kharkiv National University of Construction and Architecture
Str. Sumskaya, 40, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (057)-700-16-40, e-mail: pavlovskiy_s@mail.ru

Kostiuk Volodymyr, PhD Tech., Senior Researcher, Leading Researcher
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
Str. Chkalova, Kharkiv, Ukraine, 61070
Tel: (057)-788-43-41, e-mail: kostyuk.v@mail.ru
ORCID ID:0000-0003-0142-8060

УДК 621.184.004

Моделювання аеродинамічних процесів водотрубного парового котла ДКВР(ДС)-10/14 / Редько А.О., Давіденко А.В., Павловський С.В., Костюк В.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 79 – 86.

Наведено результати чисельного моделювання процесів течії та горіння метану з киснем у повітрі у вихровому факелі топки парового котла. Побудовано розрахункову модель пальникового газомазутного пристрою ГМГ-7 і топки двобарабанного парового водотрубного котла ДЕ-10/14. Моделювання виконано методом контрольного об'єму. Визначено структуру факелу, розподіл швидкості газів в топковому об'ємі та аеродинамічний опір топки. Розрахунки виконано для топки парового котла з вторинним випромінювачем і без вторинного випромінювача. Ил.: 3. Табл. 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: чисельне моделювання, процеси течії, паровий водотрубний котел, аеродинамічний опір.

УДК 621.184.004

Моделирование аэродинамических процессов водотрубного парового котла ДКВР(ДЕ)-10/14 / Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Костюк В.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 79 – 86.

Приведены результаты численного моделирования процессов течения и горения метана с кислородом в воздухе в вихревом факеле топки парового котла. Построена расчётная модель горелочного газомазутного устройства ГМГ-7 и топки двухбарабанного парового водотрубного котла ДЕ-10/14. Моделирование выполнено методом контрольного объёма. Определены структура факела, распределение скорости газов в топочном объёме и аэродинамическое сопротивление топки. Расчёты выполнены для топки парового котла с вторичным излучателем и без вторичного излучателя. Ил.: 3. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: численное моделирование, процессы течения, паровой водотрубный котёл, аэродинамическое сопротивление.

UDC 621.184.004

Modelling of the aerodynamic processes of water-tube boiler DKVR(DE) - 10/14 / Redko A.A., Davidenko A.V., Pavlovskii S.V., Kostyuk V.Ye. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216). – P. 79 – 86.

The results of numerical modeling of flow processes and combustion of methane with oxygen in the air in a swirling furnace plume are presented. Calculation model of oil-gas burner device GMG-7 and two-drum steam water-tube boiler DE-10/14 is built. Modelling is carried out by control volume method. The flame structure, the distribution of gas velocity in the furnace volume and aerodynamic resistance of furnace are defined. Calculations are made for heating boiler with a secondary emitter and without secondary emitter. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: numerical modeling, flow process, processes of water-tube boiler, aerodynamic resistance.

А.Р. ШЕЙКУС, асп., ГВУЗ "УГХТУ", Днепр,
И.Л. ЛЕВЧУК, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ "УГХТУ", Днепр,
В.Я. ТРИШКИН, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ "УГХТУ", Днепр,
В.И. КОРСУН, д-р техн. наук, проф., ГВУЗ "НГУ", Днепр

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРОЖИДКОСТНОГО РАВНОВЕСИЯ ПРИ ПОДВИЖНОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССАМИ РЕКТИФИКАЦИИ

Рассмотрены вопросы моделирования фазового равновесия многокомпонентных систем, приведены соответствующие алгоритмы расчетов. Экспериментально доказано повышение точности модели процесса многокомпонентной ректификации, предназначенной для исследования подвижных управляющих воздействий, путем интеграции в неё предложенной подсистемы фазового равновесия. Ил.: 4. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: фазовое равновесие, процесс многокомпонентной ректификации, подвижное управляющее воздействие.

Постановка проблемы. Процесс ректификации, широко применяемый в промышленности для разделения жидких смесей на составляющие их компоненты, характеризуется высокой энергоемкостью и себестоимостью получаемых продуктов. Важнейшими задачами управления данным процессом остаются снижение затрат на его ведение и повышение эффективности разделения.

Так как ректификационная установка является объектом с распределёнными параметрами, то использование традиционных управляющих воздействий, основанных только на изменениях материальных или энергетических потоков аппарата, не является высокоэффективным. Очевидно, что решение задач управления требует использования новых научных подходов, учитывающих и использующих распределенность ректификационных колонн как объектов управления.

Анализ литературы. В работах [1, 2] рассмотрены теоретические основы и принципы построения нового класса систем управления распределенными объектами – с использованием подвижных управляющих воздействий. В роли таких воздействий могут рассматриваться по отдельности, попарно или в совокупности интенсивность, форма и закон движения в пространстве источников вещества и/или энергии. Появление новой степени свободы – возможности выбора закона движения материального или энергетического источника – позволяет осуществлять перевод распределенного объекта в состояния, недостижимые в классе

неподвижных управляющих воздействий.

Вопросы распределённого управления процессом ректификации рассмотрены в работах [3, 4]. Результаты исследований, приведенные в этих трудах, получены с использованием математической модели процесса, адаптированной для решения задач распределённого управления, однако имеющей всё же ряд существенных недостатков:

1) Для расчета равновесной паровой фазы используется полином высокого порядка с постоянными коэффициентами. Точность такой аппроксимации для неидеальных смесей крайне низкая. При этом не учитывается ряд факторов, влияющих на форму и положение равновесной и температурных кривых. В связи с этим возникает необходимость отхода от экспериментальных данных к методам, в основе которых лежат закономерности, вытекающие из теории растворов [5 – 7].

2) Не учитывается давление в ректификационной колонне, величина которого оказывает существенное влияние на концентрационные и температурные профили установки [8].

3) Разделяемая смесь сводится к бинарной. При этом другие компоненты, независимо от их концентраций в разделяемой смеси и конечных продуктах, отбрасываются как несущественные.

Указанные недостатки снижают эффективность распределённого управления процессом ректификации на основе адаптированной математической модели и должны быть устранены.

Цель статьи – повышение эффективности распределённого управления процессом ректификации за счёт усовершенствования используемой математической модели путем интеграции в неё подсистемы расчётов парожидкостного равновесия в бинарных и многокомпонентных смесях.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

– выбрать модель фазового равновесия и разработать на её основе алгоритмы расчета составов равновесных фаз, температур кипения жидких и конденсации паробразных смесей, пригодных для расчета как бинарной, так и многокомпонентной ректификации;

– на примере бинарной смеси доказать адекватность подсистемы путем сравнения результатов моделирования, полученных с помощью разработанной модели, и результатов моделирования в специализированной программной среде Aspen Plus;

– исследовать эффективность интеграции подсистемы фазового равновесия в математическое описание ректификационной колонны на примере установок для разделения смеси метанол-вода и продуктов синтеза метилтретбутилового эфира (МТБЭ).

Теоретические основы моделирования парожидкостного равновесия. Переход вещества из одной фазы в другую происходит до тех пор, пока не установится состояние равновесия между фазами. В таком состоянии существует определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества: любой концентрации x этого компонента в жидкой фазе соответствует равновесная концентрация y^* в паровой [5]

$$y_i^* = K_i \cdot x_i. \quad (1)$$

Коэффициент фазового равновесия K_i в общем случае является функцией, зависящей от давления, температуры и состава смеси [6].

К идеальным системам относятся двухфазные системы жидкость-пар, в которых жидкая фаза подчиняется закону Рауля, а паровая фаза – закону Дальтона. Расчет коэффициента равновесия для идеальных смесей возможен по уравнению

$$K_i = \frac{P_i}{P}, \quad (2)$$

где P – давление в рассматриваемой области; P_i – давление паров чистого компонента при данной температуре T .

Большинство смесей, подвергающихся ректификации, являются неидеальными, что обуславливается межмолекулярным взаимодействием. Учитывать отклонения от идеальности возможно введением соответствующих коэффициентов: активности для жидкой фазы и летучести (фугитивности) для паровой [7].

Однако неидеальность паровой фазы проявляется в значительно меньшей степени, чем в жидкой. Это объясняется меньшей плотностью паровой фазы и, соответственно, меньшей вероятностью взаимодействия отдельных молекул. Поэтому при расчете парожидкостного равновесия, особенно в области умеренных давлений, все отклонения от идеального поведения относят к жидкой фазе, а паровая принимается идеальной.

Выражение для расчета коэффициента распределения с учетом неидеальности жидкой фазы следующее [8]

$$K_i = \frac{P_i}{P} \cdot \gamma_i, \quad (3)$$

где γ_i – коэффициент активности i -го компонента в жидкой смеси.

Как видно из (2) и (3), коэффициент активности компонентов идеальной смеси равен единице.

Подставим (3) в (1)

$$y_i^* = \frac{P_i}{P} \cdot \gamma_i \cdot x_i. \quad (4)$$

Сумма концентраций компонентов смеси равна единице

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_i^* = 1. \quad (5)$$

Просуммировав концентрации всех компонентов равновесной парообразной смеси (4) и приравняв полученную сумму к единице (5), получим

$$\sum_{i=1}^n y_i^* = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \cdot \gamma_i}{P} = 1. \quad (6)$$

Из (6) можно выразить условие парожидкостного равновесия

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \cdot \gamma_i = P. \quad (7)$$

Давления паров чистых компонентов, входящие в (7), являются функциями температуры и могут быть найдены с помощью расширенного уравнения Антуана:

$$\ln P_i = C_{1i} + \frac{C_{2i}}{C_{3i} + T_{\text{кип}}} + C_{4i} \cdot \ln T_{\text{кип}} + C_{5i} \cdot T_{\text{кип}}^{C_{6i}}, \quad (8)$$

где $C_{1-6,i}$ – известные постоянные для i -го компонента смеси, $T_{\text{кип}}$ – температура кипения.

Температура жидкой и паровой фаз, находящихся в равновесии друг с другом, равна температуре кипения жидкой фазы и конденсации равновесной ей паровой.

Основной проблемой, связанной с моделированием парожидкостного равновесия, остается определение коэффициентов активностей компонентов в разделяемых смесях. В данной работе для расчета коэффициентов активности использовалось уравнение NRTL, преимущество которого по сравнению с уравнениями Маргулеса и ван Лаара состоит в том, что его можно применять к многокомпонентным смесям, основываясь только на бинарных параметрах, а по сравнению с уравнением Вильсона – в том, что трехпараметричность уравнения позволяет точнее представить данные о равновесии в рассматриваемых системах [9]:

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_j \cdot \tau_{ji} \cdot G_{ji}}{\sum_{k=1}^v x_k \cdot G_{ki}} + \sum_{j=1}^n \frac{x_j \cdot G_{ij}}{\sum_{k=1}^n x_k \cdot G_{kj}} \cdot \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_{m=1}^n x_m \cdot \tau_{mj} \cdot G_{mj}}{\sum_{k=1}^n x_k \cdot G_{kj}} \right), \quad (9)$$

$$G_{ij} = e^{(-\alpha_{ij} \cdot \tau_{ij})}, \quad (10)$$

$$\tau_{ij} = \frac{A_{ij}}{R \cdot T_{\text{кип}}}, \quad (11)$$

$$\alpha_{ij} = 0,3, \quad (12)$$

$$\tau_{ii} = \tau_{jj} = 0, \quad (13)$$

$$G_{ii} = G_{jj} = 1, \quad (14)$$

где i, j – номера компонентов бинарной системы; τ_{ij} , τ_{ji} , α_{ij} – независимые параметры бинарного взаимодействия уравнения NRTL; G_{ij} , G_{ji} – рассчитываемые параметры взаимодействия между компонентами i и j ; A_{ij} – параметр аппроксимирующего уравнения (11): R – универсальная газовая постоянная.

Параметр α_{ij} является чисто эмпирическим. В зависимости от химической природы составляющих смесь компонентов, авторы [10] предлагают пользоваться диапазоном величин 0,2 – 0,47. Ввиду отсутствия справочных данных возможно принять данный параметр равным 0,3 для всех компонентов.

Из уравнений (9) – (14) видно, что расчет коэффициентов активности проводится на основании известного состава смеси (\bar{x}) и температуры, которая равна температуре кипения ($T_{\text{кип}}$).

Предлагается использовать для определения коэффициентов активности компонентов смеси преобразованное и упрощенное уравнение NRTL, позволяющее отказаться от дополнительных уравнений (13) и (14):

$$\ln \gamma_i = \left(\sum_{j=1, \neq i}^n x_j \cdot \tau_{ji} \cdot G_{ji} \right) \cdot \left(\sum_{j=1, \neq i}^n x_j \cdot G_{ji} \right) / \left(x_i + \sum_{j=1, \neq i}^n x_j \cdot G_{ji} \right)^2 + \sum_{j=1, \neq i}^n x_j \cdot G_{ij} \cdot \left(x_j \cdot \tau_{ij} + \sum_{m=1, \neq i, \neq j}^n x_m \cdot G_{mj} \cdot (\tau_{ij} - \tau_{mj}) \right) / \left(x_j + \sum_{m=1, \neq j}^n x_m \cdot G_{mj} \right)^2. \quad (15)$$

Зависимости (1) – (15) составляют математическую модель парожидкостного равновесия многокомпонентных смесей, которая позволяет решать следующие важнейшие задачи:

- рассчитывать температуру кипения жидкой смеси заданного состава при заданном давлении;
- определять состав паровой фазы, которая находится в равновесии с жидкой известной состава;
- проводить обратные расчеты, в случае, когда известной является паровая фаза, а параметры жидкой необходимо определять.

Алгоритм расчета температуры кипения жидкой многокомпонентной смеси. Уравнения (7), (8), (15) содержат одну неизвестную искомую величину – $T_{\text{кип}}$. Так как выразить её в явном виде невозможно, то решение осуществимо только итерационным способом.

Задается начальное приближение для искомой температуры. На основании состава и температуры определяются коэффициенты активности ($\bar{\gamma}$) и давления чистых компонентов (\bar{P}).

Решение проводится методом Ньютона. Из уравнения (7) получают выражение функции $f(T)$, ноль которой обеспечивает решение задачи

$$f(T) = P - \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \cdot \gamma_i = 0. \quad (16)$$

Согласно методу Ньютона:

$$T = T - \frac{f(T)}{f'(T)}. \quad (17)$$

Значение первой производной

$$f'(T) = \frac{f(T + \Delta T) - f(T)}{\Delta T}. \quad (18)$$

Согласно (17) и (18) окончательное выражение для уточнения значения температуры кипения

$$T = T + \frac{f(T) \cdot \Delta T}{f(T) - f(T + \Delta T)}. \quad (19)$$

Расчеты необходимо повторять до тех пор, пока условие (16) не выполнится с требуемой точностью.

Алгоритм расчета состава равновесной паровой фазы. Алгоритм определения температуры кипения жидкой смеси составляет основу алгоритма расчета равновесного состава паровой фазы. Рассчитанное с помощью итерационного процесса значение температуры позволяет определить давления и коэффициенты активности

компонентов жидкой смеси при этой температуре (уравнения (8) и (15)). Далее концентрации каждого компонента равновесной парообразной смеси рассчитываются по уравнению (4).

Алгоритм расчета параметров равновесной жидкой фазы. На практике зачастую возникает необходимость решения обратной задачи: нахождения состава равновесной жидкой фазы и температуры конденсации парообразной смеси на основании её состава \bar{y} и давления P в рассматриваемой области.

Выразим из уравнения (4) равновесную концентрацию i -го компонента в жидкой фазе

$$x_i^* = \frac{P}{P_i \cdot \gamma_i} \cdot y_i. \quad (20)$$

Давления чистых компонентов и коэффициенты активности являются функциями температуры кипения и состава искомой жидкой фазы, а температура кипения – состава жидкой фазы и давления, которое известно.

В этом случае $n - 1$ значение концентраций искомой равновесной жидкой фазы необходимо уточнять итерационными методами. Алгоритм решения состоит из следующих действий.

Задается начальное приближение равновесного состава жидкой фазы $\bar{x}^* = \bar{y}$.

Для такой жидкой фазы выполняется алгоритм расчета температуры кипения. На основании этой величины и состава жидкой смеси определяются давления чистых компонентов и коэффициенты активности.

Согласно (20) выражения для уточнения равновесной концентрации i -го компонента:

$$f_i(\bar{x}^*) = \frac{P}{P_i \cdot \gamma_i} \cdot y_i - x_i^*, \quad (21)$$

$$x_i^* = x_i^* + b \cdot f_i(\bar{x}^*), \quad (22)$$

где b – угловой коэффициент.

Итерационная процедура завершается при выполнении с требуемой точностью условия

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left| f_i(\bar{x}^*) \right| = \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{P}{P_i \cdot \gamma_i} \cdot y_i - x_i^* \right| = 0. \quad (23)$$

Экспериментальные исследования рабочих режимов ректификационных колонн с использованием разработанных алгоритмов. Работоспособность и точность алгоритмов исследованы на примере бинарной азеотропной смеси метанол-метилтретбутиловый эфир (МТБЭ). В связи с отсутствием экспериментальных данных моделирование проводилось параллельно с использованием среды Aspen Plus (рис. 1). Ключевым компонентом бинарной смеси выбран метанол.

Погрешности в расчетах объясняются отсутствием эмпирических данных – надежных коэффициентов бинарного взаимодействия в уравнении NRTL.

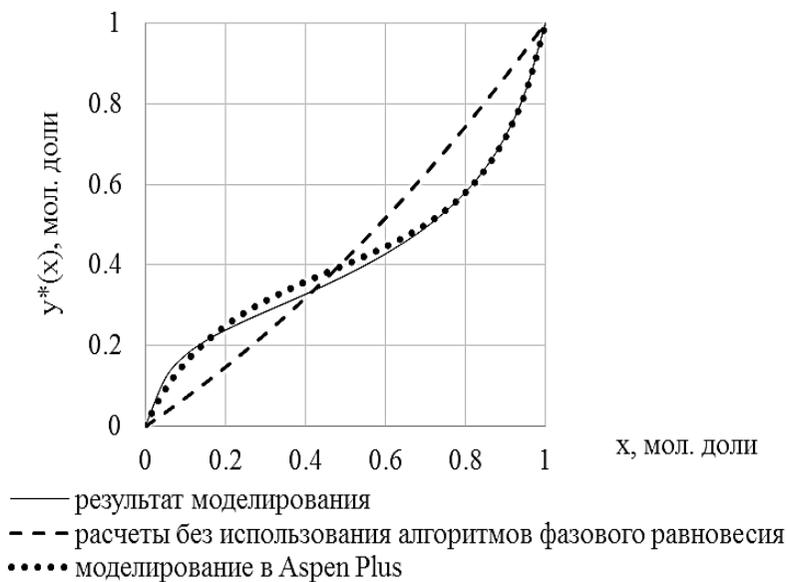


Рис. 1. Кривая равновесия смеси метанол-МТБЭ

Диаграмма на рис. 2 демонстрирует существенные различия в результатах расчета температурных кривых с использованием подпрограмм фазового равновесия и без использования.

Математическая модель фазового равновесия многокомпонентных смесей и соответствующие алгоритмы расчета реализованы в виде подпрограмм, которые успешно интегрированы в программное обеспечение для расчета статических режимов ректификационных колонн. Эффективность интеграции модели фазового равновесия исследована путем расчетов концентрационных профилей установки с использованием соответствующих алгоритмов и без них.

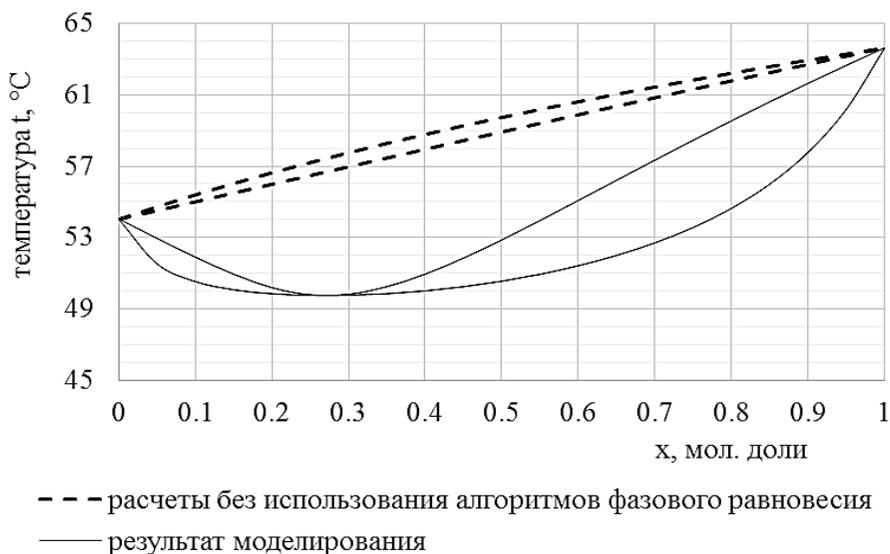


Рис. 2. Температурные кривые смеси метанол-МТБЭ

На рис. 3 приведены концентрационные профили МТБЭ, рассчитанные с использованием одних и тех же начальных данных, которые соответствуют нормальному режиму работы колонны.

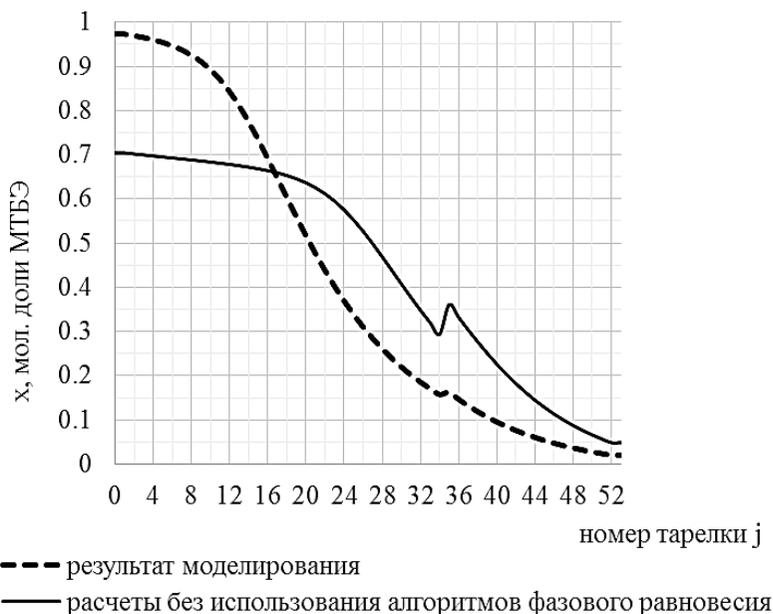


Рис. 3. Концентрационные профили колонны для разделения продуктов синтеза МТБЭ

Рассматривались 10 основных компонентов в питании, концентрации которых превышают 0,1%: пропан, н-бутан, изобутан, бутилен, цис-бутен, транс-бутен, изобутилен, пентан, метанол, МТБЭ. Куб колонны имеет индекс $j = 0$, а две последние "тарелки" определяют концентрации ключевых компонентов во флегме и дистилляте соответственно.

Согласно технологическому регламенту установки производства МТБЭ, используемой АО "Укртатнафта" в г. Кременчуг, концентрация МТБЭ в кубовом продукте должна составлять не менее 98 %, что не согласуется с результатами расчетов без использования алгоритмов фазового равновесия.

Подвижное управление процессами ректификации с использованием алгоритмов расчета парожидкостного равновесия. Несомненно, допущения об идеальности разделяемой смеси приводят к значительным погрешностям результатов не только при расчетах рабочих режимов ректификационных колонн, но и при определении величин оптимальных управляющих воздействий.

Влияние межмолекулярного взаимодействия компонентов смеси на номер оптимальной тарелки питания исследовалось на примере ректификационной колонны для разделения смеси метанол-вода. На рис. 4 изображены статические характеристики аппарата по каналу "номер тарелки питания – качество дистиллята".

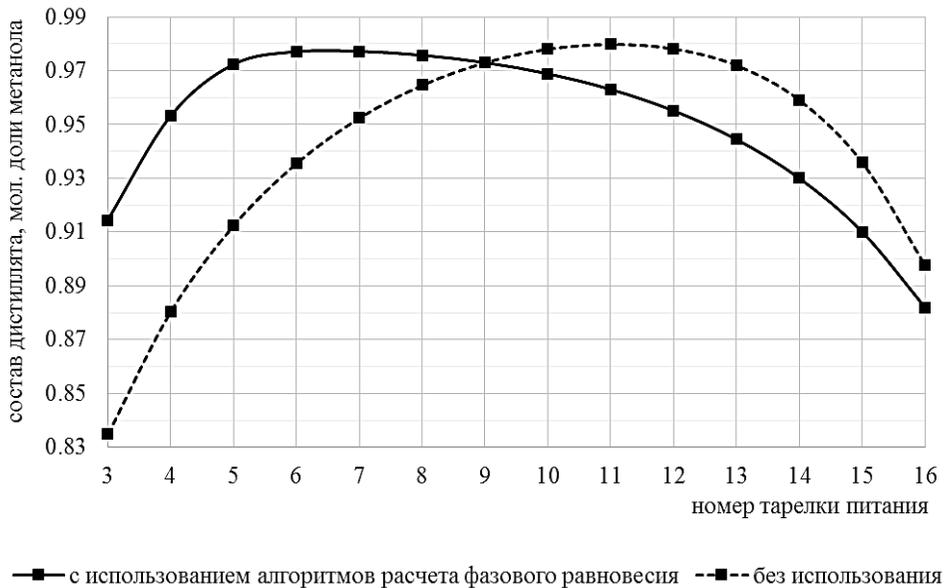


Рис. 4. Зависимости качества дистиллята от номера тарелки питания

Расчеты проводились с использованием разработанных алгоритмов фазового равновесия и без использования. И в первом случае, и во втором непосредственно перед расчетами проводилась параметрическая идентификация модели ректификационной колонны. Идентификация заключалась в определении таких значений коэффициентов массоотдачи в жидкой и паровой фазах, которые позволили согласовать результаты расчетов на основании модели с экспериментальными данными, указанными в нормах технологического режима: тарелка питания – 9-я, концентрация метанола – 97,3 % мол.

Характеристики носят экстремальный характер, что позволяет отследить оптимальную тарелку питания. Результаты моделирования без использования алгоритмов расчета парожидкостного равновесия позволяют сделать вывод о необходимости подачи сырья на 11-ю тарелку, ожидаемая концентрация метанола при этом 98 %. В действительности же в этом случае, как показывают расчеты с использованием усовершенствованной модели, качество дистиллята не превысит 96,3 %, а концентрация примесей (воды) возрастет на 85%.

Использование алгоритмов расчета парожидкостного равновесия смещает рассчитываемый номер оптимальной тарелки питания на 4 контактных устройства: с 11-го на 7-й. Так как в колонне всего 18 тарелок, то такая погрешность составляет 22,2 %.

Выводы. Результаты расчетов ректификационной установки с использованием математической модели, в которой не рассматриваются вопросы фазового равновесия, характеризуются существенными погрешностями и не отражают реальной картины распределения компонентов между конечными продуктами. На примере колонны для разделения продуктов синтеза МТБЭ видно, что рассчитанные концентрации примесей в кубовом продукте возрастают от 2% до 30%.

Статические характеристики ректификационных колонн по каналу "номер тарелки питания – качество продуктов разделения" носят экстремальный характер, при этом допущение об идеальности разделяемой смеси существенно смещает точку экстремума. Использование математической модели процесса ректификации без модели фазового равновесия в целях прогнозирования режима работы и определения величин оптимальных управляющих воздействий приводит к существенному повышению затрат на ведение процесса и потерям ценных ресурсов.

Модель фазового равновесия, интегрированная в общее описание ректификационной установки, позволяет значительно повысить точность расчетов математического обеспечения систем автоматического подвижного управления процессами многокомпонентной ректификации

и может использоваться в системах оптимального, адаптивного управления.

Список литературы: 1. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с. 2. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: учеб. пособие / Э. Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2005. – 292 с. 3. Белоброва Е.В. Автоматическое управление тепломассообменными процессами с подвижными распределенными регулирующими воздействиями / Е.В. Белоброва, А.Р. Шейкус, В.И. Корсун // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/2 (71). – С. 51-55. 4. Левчук И.Л. Способ управления процессом ректификации с помощью распределенных управляющих воздействий / И.Л. Левчук, А.Р. Шейкус, В.Я. Тришкин // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2015. – № 14 (1123). – С. 100-105. 5. Процессы и аппараты химической технологии: учеб.: в 2-х ч. Ч. 2 / Л.Л. Товажнянський, А.П. Готлинская, В.А. Лещенко и др.; под ред. Л.Л. Товажнянского. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2005. – 532 с. 6. Комиссаров Ю.А. Математическое моделирование при расчете парожидкостного равновесия многокомпонентных систем / Ю.А. Комиссаров, Дам Куанг Шанг // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 1. – С. 43-50. 7. Тархов К.Ю. Особенности влияния относительной летучести компонентов на расчет и структуру диаграмм фазового равновесия жидкость-пар многокомпонентных смесей / К.Ю. Тархов, Л.А. Серафимов, А.М. Андреева // Вестник МИТХТ. – 2011. – Т. 6. – № 1. – С. 61-73. 8. Holland, C.D. Fundamentals of multicomponent distillation / C.D. Holland. – N. Y.: McGraw-Hill Book Company, 1994. – 626 p. 9. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: в 2-х ч. Ч. 1. – М.: Мир, 1989. – 304 с. 10. Reid R.C. The properties of gases and liquids / R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling. – N. Y.: McGraw-Hill, Inc., 1987. – 741 p.

References:

1. Butkovskii, A.G. (1975), *Control methods of distributed parameter systems*, Nauka, Moscow, 568 p.
2. Rapoport, E.Ya. (2005), *Analysis and synthesis of automatic control systems with distributed parameters*, High school, Moscow, 292 p.
3. Belobrova, E.V., Sheikus, A.R. and Korsun, V.I. (2014), "Automatic control of heat and mass transfer processes with movable distribution of regulatory impact", *Eastern-European journal of enterprise technologies*, No. 5/2 (71), pp. 51-55.
4. Levchuk, I.L., Sheikus, A.R. and Trishkin, V.Ya. (2015), "Control method of distillation process with distributed control effects", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: New solutions in modern technologies*, No. 14 (1123), pp. 100-105.
5. Tovazhnyans'kii, L.L., Gotlinskaya, A.P. and Leshchenko, V.A. (2005), *Processes and devices of chemical technology, Vol. 2*, By Tovazhnyans'kii, L.L. (Ed.), NTU "KhPI", Kharkov, 532 p.
6. Komissarov, Yu.A. and Shang, D.K. (2011), "Mathematical modeling in calculating vapor-liquid equilibria of multicomponent systems", *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, No. 1, pp. 43-50.
7. Tarkhov, K.Yu, Serafimov, L.A. and Andreeva, A.M. (2011), "Features of influence of the relative volatilities of the components in the calculation and structure diagrams of phase equilibrium liquid-vapor multicomponent mixtures", *Vestnik MITHT*, Vol. 6, No. 1, pp. 61-73.
8. Holland, C.D. (1994), *Fundamentals of multicomponent distillation*, McGraw-Hill Book Company, New York, 626 p.

9. Walas, S.M. (1989), *Phase equilibria in chemical engineering, Trans. from Eng., Vol. 1*, Mir, Moscow, 304 p.
10. Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Poling, B.E. (1987), *The properties of gases and liquids*, McGraw-Hill Book Company, New York, 741 p.

Статтю представил д-р техн. наук, проф. ГВУЗ "УГХТУ" Зеленцов Д.Г.

Поступила (received) 05.07.2016

Sheikus Anton, postgraduate
Ukrainian State University of Chemical Technology
Ave Gagarin, 8, Dnepr, Ukraine, 49005
Tel: (067) 732 16 82, e-mail: a.sheykus@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-5575-098X

Levchuk Igor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ukrainian State University of Chemical Technology
Ave Gagarin, 8, Dnepr, Ukraine, 49005
ORCID ID: 0000-0002-8983-0558

Trishkin Vladislav, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ukrainian State University of Chemical Technology
Ave Gagarin, 8, Dnepr, Ukraine, 49005
ORCID ID: 0000-0001-5233-6284

Korsun Valeriy, Doctor of Technical Sciences, Professor
State Higher Educational Institution "National Mining University"
Ave K. Marx, 19, Dnepr, Ukraine, 49600
ORCID ID: 0000-0001-8102-4335

УДК 681.51.012

Моделювання парорідинної рівноваги при рухливому керуванні процесами ректифікації / Шейкус А.Р., Левчук І.Л., Тришкін В.Я., Корсун В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 87 – 100.

Розглянуті питання моделювання фазової рівноваги багатоконпонентних систем, наведені відповідні алгоритми розрахунків. Експериментально доведено підвищення точності моделі процесу багатоконпонентної ректифікації, призначеної для дослідження рухливих керуючих впливів, шляхом інтеграції в неї запропонованої підсистеми фазової рівноваги. Ил.: 4. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: фазова рівновага, процес багатоконпонентної ректифікації, рухливий керуючий вплив.

УДК 681.51.012

Моделирование парожидкостного равновесия при подвижном управлении процессами ректификации / Шейкус А.Р., Левчук И.Л., Тришкин В.Я., Корсун В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 87 – 100.

Рассмотрены вопросы моделирования фазового равновесия многокомпонентных систем, приведены соответствующие алгоритмы расчетов. Экспериментально доказано повышение точности модели процесса многокомпонентной ректификации, предназначенной для исследования подвижных управляющих воздействий, путем интеграции в неё предложенной подсистемы фазового равновесия. Ил.: 4. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: фазовое равновесие, процесс многокомпонентной ректификации, подвижное управляющее воздействие.

UDC 681.51.012

Modelling of vapor-liquid equilibrium at a mobile control rectification processes / Sheikus A.R., Levchuk I.L., Trishkin V.Ya., Korsun V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (1216). – P. 87 – 100.

The modeling of phase equilibrium in multicomponent systems is analyzed and corresponding calculation algorithms are exemplified. The increasing accuracy of the model of multicomponent rectification process designed to study the movable control actions by integrating the proposed subsystem phase equilibrium is proved experimentally. Figs.: 4. Refs.: 10 titles.

Keywords: phase equilibrium, multicomponent rectification processes, the movable control actions.

*Новые информационные технологии в
медицине и биологии*

І.С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, доц., проф., СНУ
ім. В. Даля, Северодонецьк,

Т.О. БІЛОБОРОДОВА, асп., СНУ ім. В. Даля, Северодонецьк

ПОШУКОВИЙ АНАЛІЗ ДАНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЛЕВАНТНИХ ФАКТОРІВ ГІПОКСИЧНОГО УРАЖЕННЯ ПЛОДА

Обґрунтовано актуальність пошукового аналізу даних для вивчення властивостей досліджуваних даних перебігу вагітності. Проведено обробку даних з використанням статистичних, графічних, формальних параметричних та непараметричних методів дослідження. За результатами кластерного аналізу виділено групу факторів, з обґрунтованим значущим впливом на розвиток патології плоду. Підтверджено наявність взаємозв'язку між окремими виділеними факторами перебігу вагітності та наявністю досліджуваної патології у новонародженого, для досліджуваного набору даних отримано нові угруповання факторів перебігу вагітності. Іл.: 2. Табл.: 3. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: пошуковий аналіз даних, кластерний аналіз, патологія у новонародженого, угруповання факторів.

Опис проблеми. Дослідження останніх десятиліть і технології аналізу даних відкрили нові ідеї і розширили розуміння причин патологій розвитку плода. Разом з тим, ряд захворювань, серед яких гіпоксичні ураження плода, залишаються в центрі уваги медиків і аналітиків. Внутрішньоутробна гіпоксія пов'язана з різними показниками здоров'я матері, плаценти і плода, які можуть проявлятися по-різному і мати різні наслідки. У цьому сенсі своєчасне виявлення показників перебігу вагітності, здатних прогнозувати розвиток гіпоксії плода, є актуальною задачею. Відправною точкою в цих дослідженнях є пошуковий аналіз, який дозволяє проводити відбір діагностичних ознак і попередню інтерпретацію даних.

Об'єктом даного дослідження є ретроспективні набори даних, отримані в процесі спостереження за жінками, що перебували на 12 – 38 тижнях вагітності.

Аналіз літературних даних. Пошуковий аналіз даних є необхідним етапом вивчення властивостей обраних факторів, визначення дійсно потенційно корисних і важливих кореляцій і закономірностей в наявних даних. Однією з головних цілей пошукового аналізу даних є зменшення розмірності вихідних даних для досягнення їх оптимальної компактності за умови мінімальної втрати вихідної інформації. Результатом такого аналізу є перехід від безлічі вихідних змінних до істотно меншого числа нових змінних [1]. Так, автори [2] представили в своїй роботі методику

кількісного аналізу медичних даних, яка допоможе на початковому етапі дослідження виявити наявну прогностичну інформацію в досліджуваних даних. Першим кроком в інтелектуальному аналізі даних автори пропонують графічний метод визначення нормальності даних за допомогою гістограм, та, на підставі отриманих результатів, подальше визначення статистичної значущості показників за допомогою коефіцієнта кореляції Спірмана. В роботі також надано методiku зменшення кількості пояснюючих змінних, що включає застосування статистичних тестів, алгоритмів класифікації, використання крос-валідації. В роботі [3] надано приклад застосування пошукового аналізу до даних нейровізуалізації. Автори доводять перевагу використання графічного методу аналізу даних за допомогою функціональної вічкової діаграми для аналізу періодограмм спектральної області даних часових рядів електро-енцефалограми, в порівнянні з використанням класичної діаграми. Аналіз материнської смертності з застосуванням статистичного аналізу даних наведено в роботі [4], де безперервні змінні досліджені за допомогою критерію U Манна-Уїтні та представлені у вигляді медіани і діапазону. Категоріальні змінні автори порівнювали за допомогою точного критерію Фішера і представили у вигляді частот. Аналіз робіт в області методології пошукового аналізу даних в медичних дослідженнях показав потенційну можливість використання даного підходу для пошуку релевантних факторів гіпоксичних уражень плода, разом з тим, спеціалізовані медичні дослідження, зокрема [5 – 7] вказують на те, що визначення наявності або відсутності гіпоксії з набору даних у ряді випадків є проблематичним (немає жодної змінної, що чітко ідентифікує гіпоксію). Таким чином, для наявного набору даних поточне завдання полягає в пошуку і визначенні значущих діагностичних ознак і їх ранжування.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є виділення релевантних факторів перебігу вагітності для розвитку гіпоксії у новонародженого. Використовуючи методи аналізу даних необхідно виконати пошук і виділити релевантні фактори та з'ясувати, які набори даних і в якій послідовності можуть служити показниками і (або) предикторами розвитку досліджуваної патології.

Виконання завдань реалізовано у вигляді наступних етапів: проведено аналіз відсутніх значень; визначено основні міри мінливості досліджуваних факторів; визначено розподіл частот ймовірностей досліджуваних даних за допомогою графічного методу та з застосуванням формального тесту Колмогорова-Смірнова; визначення статистичної значимості досліджуваних показників перебігу вагітності; кластерний аналіз показників з побудовою дендограмм для виділення груп показників перебігу вагітності; визначення значущості виділених

груп показників перебігу вагітності за допомогою критерію Краскала-Уолліса.

Опис досліджуваних даних. За результатами вивчення медичної літератури про розвиток гіпоксії у новонародженого, виділено 29 показників які, за даними дослідників [5 – 7], мають високу ймовірність впливу на розвиток даної патології у новонародженого: вік, показники швидкості осідання еритроцитів (ШОЕ) та рівня гемоглобіну на 12, 21, 30 тижнях вагітності, протромбіновий індекс, систолічний та діастолічний тиск на 24, 28, 30, 34, 36, 38 тижнях вагітності, вертикальний розмір амніотичної рідини, ступінь зрілості і товщина плаценти, частота серцебиття плода на 20 – 24 і 30 – 38 тижнях вагітності, біофізичний профіль плода на 30 – 38 тижнях вагітності, діагноз новонародженого. Всі показники є кількісними, крім протромбінового індексу, ступеня зрілості плаценти на 20 – 24, 30 – 38 тижнях вагітності і біофізичного профілю плода, які є порядковими. Методи розвідувального аналізу застосовувалися для даних перебігу вагітності та стану новонароджених у 186 жінок. Обсяг порівнюваних наборів даних приблизно однаковий: 81 випадок новонароджених з патологією і 105 випадків новонароджених без патології.

Аналіз відсутніх значень. Відсутні значення в даних присутні в більшості статистичних даних [8]. Потенційна небезпека таких даних складається у тому, що вони можуть зменшити ефективність дослідження та привести до необ'єктивних результатів. Для того, щоб вирішити, як вчинити з відсутніми даними, корисно знати, причини їх відсутні. У досліджуваному випадку це пов'язано з відсутністю деяких протоколів лікування, відсутністю законодавчої документації, яка встановлює обов'язкові для заповнення дані та відсутність міри покарання за невиконання цих вимог, недбалість медперсоналу при заповненні документації, відсутність у вагітної жінки коштів для проходження необхідних, призначених лікарем досліджень тощо. Відповідно до типу відсутніх даних [9, 10], значення відсутні випадково. Кількість і процентне співвідношення відсутніх значень в даних за показниками представлені в табл. 1.

Аналіз кількості та процентного співвідношення відсутніх значень в даних за показниками, показав, що в більшості показників їх кількість не є критичною. Найбільша кількість відсутніх значень в даних за показником біофізичного профілю плода на УЗД 30 – 38 тижнів вагітності, настільки велика, що на думку авторів, проаналізувавши результати проведеного аналізу, в подальшому його можливо доведеться виключити. Також високий відсоток відсутніх даних у показників вертикального розміру амніотичної рідини на УЗД 30 – 38 тижнів і

протромбінового індексу. Грунтуючись на співвідношенні невеликого розміру досліджуваного набору даних до кількості відсутніх даних, було прийнято рішення для більшості використаних методів аналізу, описаних нижче, використовувати ігнорування таких відсутніх значень окремо, не ігноруючи при цьому спостереження повністю.

Таблиця 1

Кількісні показники і процентне співвідношення відсутніх значень в даних

Фактор перебігу вагітності (тижні вагітності* – т.в.)	Дані			
	Включені		Відсутні	
	Кількість	Процент	Кількість	Процент
Вік вагітної жінки	186	100,0%	0	0,0%
ШОЕ на 12 (т.в.)	157	84,4%	29	15,6%
ШОЕ на 21 т.в.	171	91,9%	15	8,1%
ШОЕ на 30 т.в.	150	80,6%	36	19,4%
Гемоглобін на т.в.	162	87,1%	24	12,9%
Гемоглобін на 21 т.в.	172	92,5%	14	7,5%
Гемоглобін на 30 т.в.	155	83,3%	31	16,7%
Протромбіновий індекс	128	68,8%	58	31,2%
Систоличний тиск на 24 т.в.	173	93,0%	13	7,0%
Діастолічний тиск на 24 т.в.	173	93,0%	13	7,0%
Систоличний тиск на 28 т.в.	171	91,9%	15	8,1%
Діастолічний тиск на 28 т.в.	171	91,9%	15	8,1%
Систоличний тиск на 30 т.в.	177	95,2%	9	4,8%
Діастолічний тиск на 30 т.в.	177	95,2%	9	4,8%
Систоличний тиск на 34 т.в.	168	90,3%	18	9,7%
Діастолічний тиск на 34 т.в.	168	90,3%	18	9,7%
Систоличний тиск на 36 т.в.	161	86,6%	25	13,4%
Діастолічний тиск на 36 т.в.	161	86,6%	25	13,4%
Систоличний тиск на 38 т.в.	154	82,8%	32	17,2%
Діастолічний тиск на 38 т.в.	154	82,8%	32	17,2%
Вертикальний розмір амніотичної рідини на 20-24 т.в.	139	74,7%	47	25,3%
Зрілість плаценти на 20-24 т.в.	168	90,3%	18	9,7%
Товщина плаценти на 20-24 т.в.	167	89,8%	19	10,2%
Серцебиття плоду на 20-24 т.в.	165	88,7%	21	11,3%
Вертикальний розмір амніотичної рідини на 30-38 т.в.	116	62,4%	70	37,6%
Зрілість плаценти на 30-38 т.в.	146	78,5%	40	21,5%
Товщина плаценти на 30-38 т.в.	146	78,5%	40	21,5%
Біофізичний профіль плоду на 30-38 т.в.	68	36,6%	118	63,4%
Серцебиття плоду на 30-38 т.в.	146	78,5%	40	21,5%

Оцінка мінливості досліджуваних факторів. На другому етапі дослідження проведено аналіз мір мінливості кількісних факторів

перебігу вагітності для норми і патології та визначення наступних показників досліджуваних даних: середнє значення [11, 12], стандартне відхилення, дисперсія [13]. Результати розрахунків міри мінливості даних для показників перебігу вагітності з наявністю і відсутністю гіпоксії у новонародженого представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні числові статистичні показники факторів перебігу вагітності з наявністю і відсутністю гіпоксії у новонародженого

Фактор перебігу вагітності (тижні вагітності* – т.в.)	Новонароджений з гіпоксією			Новонароджений без гіпоксії		
	Середнє значення	Стандартне відхилення	Дисперсія	Середнє значення	Стандартне відхилення	Дисперсія
Вік вагітної жінки	27.30	4.72	22.31	27.18	5.65	31.99
ШОЕ на 12 т.в.	22.14	12.18	148.49	23.34	12	144.2
ШОЕ на 21 т.в.	30.78	14.76	218.03	29.01	13.96	194.96
ШОЕ на 30 т.в.	31.7	13.86	192.09	33.65	14.7	216.12
Гемоглобін на 12 т.в.	113.51	13.38	179.01	115.26	16.92	286.48
Гемоглобін на 21 т.в.	110.86	11.9	141.69	109.18	12.13	147.3
Гемоглобін на 30 т.в.	109.18	12.13	147.3	103.13	11.76	138.28
Сістолічний тиск на 24 т.в.	106.86	11.49	132	104.45	10.56	111.51
Діастолічний тиск на 24 т.в.	66.8	8.44	71.36	64.75	9.8	96.1
Сістолічний тиск на 28 т.в.	105.87	10.74	115.4	105.5	11.01	121.36
Діастолічний тиск на 28 т.в.	66.81	9.07	82.33	65.69	8.76	76.75
Сістолічний тиск на 30 т.в.	107.39	11.6	134.59	105	10.18	125
Діастолічний тиск на 30 т.в.	66.99	7.94	63.1	65.39	7.43	55.24
Сістолічний тиск на 34 т.в.	110.29	10.96	120.2	108.72	11.26	126.96
Діастолічний тиск на 34 т.в.	70.21	8.57	73.5	67.96	8.58	73.62
Сістолічний тиск на 36 т.в.	112.8	15.48	239.75	108	17.7	97.79
Діастолічний тиск на 36 т.в.	72.28	12.26	150.42	69.69	9.88	97.79
Сістолічний тиск на 38 т.в.	113.03	11.56	133.75	110.57	13.33	177.83
Діастолічний тиск на 38 т.в.	71.24	9.68	93.72	70.45	9.84	96.91
Вертикальний розмір амніотичної рідини на 20-24 т.в.	80.71	43.79	1918.17	82.46	42.25	1785.48
Товщина плаценти на 20-24 т.в.	24.5	5.69	32.45	23.92	4.72	22.35
Серцебиття плоду на 20-24 т.в.	146.71	7.69	59.26	145.59	5.95	35.44
Вертикальний розмір амніотичної рідини на 30-38 т.в.	87.6	58.25	3393.85	104.17	53.26	2837.56
Товщина плаценти на 30-38 т.в.	34.07	3.87	15.01	36.92	7.42	55.19
Серцебиття плоду на 30-38 т.в.	141.39	8.81	77.62	143.26	7.02	49.38

Вивчивши міри мінливості досліджуваних даних, зроблено висновок про відмінність середнього значення для показника вертикального розміру амніотичної рідини на УЗД 30 – 38 тижнях вагітності і про відсутність принципових відмінностей в інших показниках, які б могли вказати на фактори, що мають вагомий вплив на виникнення патології.

Аналіз розподілу частот ймовірностей. На наступному етапі дослідження було проведено визначення розподілу частот ймовірностей досліджуваних даних. Цей етап необхідний для визначення методів подальшого дослідження даних, тому що для нормально розподілених даних математичною статистикою вироблені ефективні методи дослідження, які, однак, не придатні для даних які не відповідають нормальному розподілу.

За допомогою стандартного відхилення визначено значення факторів, що мають більший вплив на ймовірність розвитку гіпоксії у новонародженого. Так, наприклад, стандартне відхилення показника перебігу вагітності "гемоглобін" на 12 тижні вагітності для новонародженого з діагнозом "гіпоксія" дорівнює 13.38.

При відсутності у новонародженого гіпоксії, ця міра дорівнює 16.92. Виходячи з цього, при оцінці ймовірності виникнення гіпоксії новонародженого, можна зробити висновок, що при значеннях показника перебігу вагітності "гемоглобін" на 12 тижні вагітності від 100.13 до 126.89 ймовірність виникнення гіпоксії у новонародженого вища. Найбільше стандартне відхилення зафіксовано для показників вертикального розміру амніотичної рідини та товщини плаценти на 30 – 38 тижня вагітності, що свідчить про високу варіативність показників. Дисперсія цих показників також вказує на їх високу мінливість.

В результаті, виділено один фактор, який, з певною часткою ймовірності, може впливати на виникнення патології – вертикальний розмір амніотичної рідини на УЗД 30 – 38 тижнях вагітності.

Для визначення розподілу частот ймовірностей даних і перевірки на відповідність даних нормальному розподілу використано графічний спосіб – гістограми [14, 15]. Отримані гістограми для кількісних показників перебігу вагітності представлені на рис. 1.

Отримані гістограми розподілу частот кількісних показників зіставлені з кривою нормального розподілу. Розподіл даних в більшій чи меншій мірі відхиляється від кривої нормального розподілу.

При зіставленні гістограм можна говорити про те, що більша частина факторів не відповідає нормальному розподілу. До факторів, розподіл яких більшою мірою відповідає нормальному розподілу можна віднести: вік, рівень гемоглобіну на 12 і 21 тижнях вагітності, товщина

плаценти і частота серцебиття плода на УЗД 20 – 24 тижнях вагітності, товщина плаценти на УЗД 30 – 38 тижнях вагітності.

Скориставшись критерієм Колмогорова-Смірнова проведено уточнення отриманих при використанні графічного методу результатів. Для показників перебігу вагітності ШОЕ на 21 тижні вагітності, ШОЕ на 30 тижні вагітності, гемоглобін на 21 тижні вагітності, гемоглобін на 30 тижні вагітності значення статистичної помилки більше, ніж рівень $p = 0,05$, отже, за цими атрибутам розподіл істотно не відрізняється від нормального.

Для решти показників статистична помилка менше, ніж рівень $p = 0,05$, отже, розподіл істотно відрізняється від нормального розподілу.

На підставі отриманих результатів, можна зробити висновок про те, що параметричні методи аналізу доцільно використовувати для таких показників перебігу вагітності: ШОЕ на 21 тижні вагітності, ШОЕ на 30 тижні вагітності, гемоглобін на 21 тижні вагітності, гемоглобін на 30 тижні вагітності. Для показників, що не відповідають нормальному розподілу частот ймовірностей, слід застосовувати непараметричні методи.

Статистична значущість показників. Подальше дослідження полягає у визначенні статистичної значущості виділених факторів перебігу вагітності для діагнозу "гіпоксія" у новонародженого. Для факторів, відповідних нормальному розподілу: ШОЕ на 21 тижні вагітності, ШОЕ на 30 тижні вагітності, гемоглобін на 21 тижні вагітності, гемоглобін на 30 тижні вагітності, було застосовано однофакторний дисперсійний аналіз.

Встановивши коректність і обґрунтованість використання однофакторного ANOVA за показником p -рівнем критерію Лівіня, який для ШОЕ на 21 тижні вагітності, ШОЕ на 30 тижні вагітності, гемоглобін на 21 тижні вагітності, гемоглобін на 30 тижні вагітності становить 0.482, 0.397, 1.106, 0.138 відповідно, що є більше 0,05. P -рівень критерію Лівіня говорить про те, що дисперсії порівнюваних показників однорідні, тобто між ними немає якісних відмінностей. На цій підставі можна зробити висновок про те, що результати однофакторного ANOVA можуть бути використані для порівняння цих показників.

Встановлена значимість впливу показників на рівень розвитку змінної "діагноз новонародженого" для порівнюваних показників ШОЕ на 21 тижні вагітності, – 0.644, ШОЕ на 30 тижні вагітності – 0.688, гемоглобін на 21 тижні вагітності – 3.016, гемоглобін на 30 тижні вагітності – 9.899. З чого зроблено висновок про незначний вплив показників гемоглобін на 21 тижні вагітності, гемоглобін на 30 тижні вагітності на діагноз гіпоксія у новонародженого і про дуже незначний вплив показників ШОЕ на 21 тижні вагітності, ШОЕ на 30 тижні вагітності. Для визначення статистичної значущості показників які не

відповідають нормальному розподілу використано непараметричний критерій U Манна-Уїтні. Спираючись на нульову та альтернативну гіпотези, нульова гіпотеза для показників протромбіновий індекс, вертикальний розмір амніотичної рідини, ступень зрілості плаценти та її товщина при проведенні УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності відхиляється й приймається альтернативна гіпотеза, яка свідчить про зв'язок діагнозу новонародженого та цих показників. Таким чином, виділені значущі фактори для подальшого дослідження. Рівень значущості для показників: протромбіновий індекс – 0.006, вертикальний розмір амніотичної рідини на 30 – 38 тижня вагітності – 0.020, ступінь зрілості плаценти на 30 – 38 тижня вагітності – 0.001, товщина плаценти на 30 – 38 тижня вагітності – 0.002.

Таким чином, на даному етапі дослідження, виділені фактори, які безпосередньо впливають на стан новонародженого в контексті досліджуваної патології. В порядку зменшення впливу на діагноз новонародженого, це: ступінь зрілості плаценти при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, товщина плаценти при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, протромбіновий індекс крові, вертикальний розмір амніотичної рідини при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, ШОЕ крові на 21 тижні вагітності, ШОЕ крові на 30 тижні вагітності.

Кластерний аналіз. Подальші кроки дослідження спрямовані на виявлення угруповань показників перебігу вагітності, що вірогідно впливають на ймовірність розвитку гіпоксії у новонародженого. Для визначення груп показників була застосована ієрархічна кластеризація з визначенням відстаней за допомогою квадрата відстані Евкліда за допомогою методу найдальшого сусіда. Цей метод дозволив визначити прийнятну кількість кластерів для досліджуваного набору даних і згрупувати значимо важливі параметри перебігу вагітності для розвитку патології у новонародженого. Проаналізувавши кроки агломерації визначено раціональне для досліджуваного набору даних число кластерів. Стрибокподібне збільшення значень коефіцієнта агломерації відбулося на 21 стадії роботи алгоритму, оптимальне для досліджуваного набору число кластерів – 7. По результатам кластерного аналізу отримано наступне об'єднання показників:

Кластер 1: ступінь зрілості плаценти при УЗД 20 – 24 і 30 – 38 тижнях вагітності, протромбіновий індекс, біофізичний профіль плода.

Кластер 2: ШОЕ на 12, 21, 30 тижнях вагітності, товщина плаценти при УЗД 30 – 38 тижнях вагітності.

Кластер 3: частота серцебиття плода при проведенні УЗД на 20-24 і 30-38 тижнях вагітності.

Кластер 4: систолічний тиск на 24, 28, 30, 34, 36 і 38 тижнях вагітності, рівень гемоглобіну в крові на 12, 21, 30 тижнях вагітності.

Кластер 5: діастолічний тиск на 24, 28, 30, 34, 36, 38 тижнях вагітності.

Кластер 6: вертикальний розмір амніотичної рідини на УЗД 20 – 24 тижнів вагітності.

Кластер 7: вертикальний розмір амніотичної рідини на УЗД 30 – 38 тижнів вагітності.

На рис. 1, наведено дендограму кластеризації показників перебігу вагітності на основі наявності або відсутності досліджуваної патології у новонародженого.

Для визначення значущості впливу отриманих угруповань чинників, проведено порівняння ступеня значимості відмінностей діагнозу новонародженого в отриманих семи угрупованнях. Зважаючи на об'єм досліджуваного набору даних, відповідно до їх розподілу, обрано критерій Краскала-Уолліса.

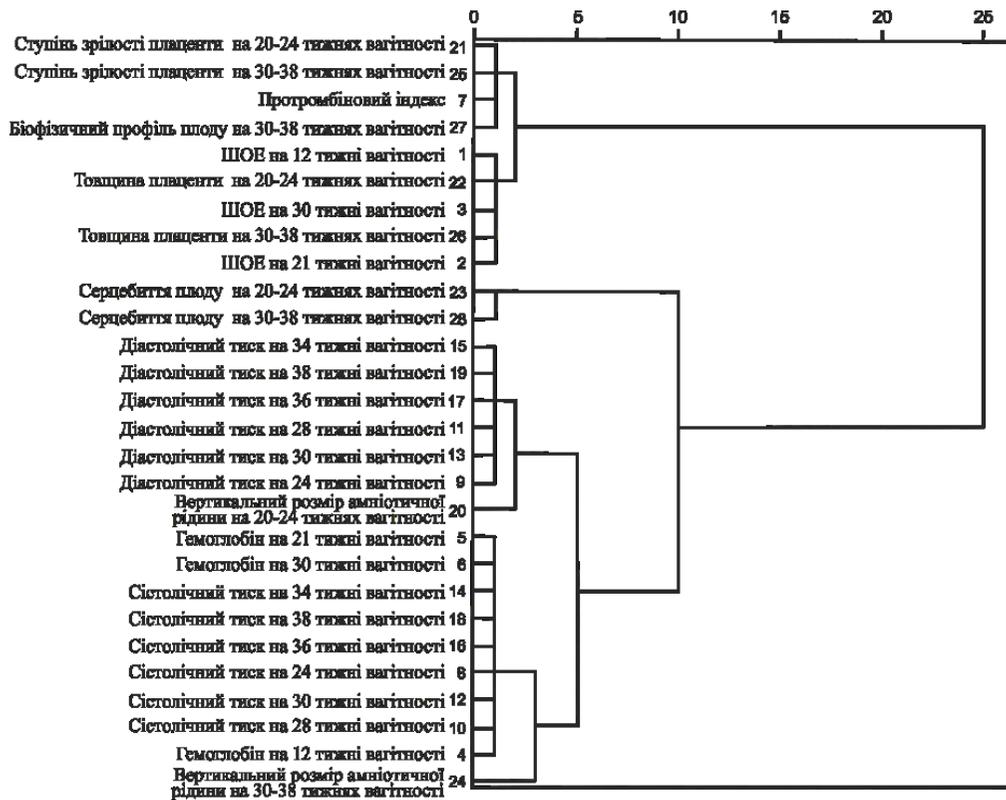


Рис. 1. Дендограма кластеризації показників перебігу вагітності

Результати порівняння ступеней значущості відмінностей діагнозу новонародженого в отриманих семи угрупованнях із застосуванням критерію Краскала-Уолліса показали, що, як це видно з табл. 3,

найбільший вплив на діагноз новонародженого мають угруповання факторів перебігу вагітності 6 і 7. Але р-рівень рівняється 0.691, тобто більше 0.05, вказує на відсутність значущих відмінностей між групами.

Таким чином, в результаті проведеного дослідження виділено угруповання 6 факторів, які безпосередньо впливають на діагноз новонародженого в контексті досліджуваної патології. В порядку убудання впливу це: ступінь зрілості плаценти при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, товщина плаценти при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, протромбіновий індекс крові, вертикальний розмір амніотичної рідини при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, ШОЕ крові на 21 тижні вагітності, ШОЕ крові на 30 тижні вагітності.

Таблиця 3

Отриманий ранг при застосуванні критерію Краскала-Уолліса

Кластери	Середній ранг
1	93,19
2	99,13
3	72,00
4	78,20
5	87,50
6	134,00
7	134,00

Висновки. На підставі аналізу медичної літератури, виділені показники перебігу вагітності, які потенційно впливають на виникнення гіпоксії у новонародженого. Сформовано набір даних показників перебігу вагітності жінок для випадків виникнення патології та її відсутності. За результатами оцінки статистичних характеристик даних зроблено висновок про відмінність показника вертикального розміру амніотичної рідини на УЗД 30-38 тижнях вагітності для спостережень з патологією і без. Вперше виділено групу факторів, з обґрунтованим значущим впливом на розвиток патології у новонародженого. В результаті роботи підтверджено наявність взаємозв'язку між окремими виділеними факторами перебігу вагітності та наявністю досліджуваної патології у новонародженого, отримано нові угруповання факторів перебігу вагітності. Для досліджуваної патології це ступінь зрілості плаценти при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, товщина плаценти при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, протромбіновий індекс крові,

вертикальний розмір амніотичної рідини при УЗД на 30 – 38 тижнях вагітності, ШОЕ крові на 21 тижні вагітності, ШОЕ крові на 30 тижні вагітності. Подальше дослідження буде направлено на виявлення менш залежних факторів розвитку патології з пограничних значень.

Список літератури: 1. *Наследов А.Д.* SPSS 19: профессиональный статистический анализ данных / *А.Д. Наследов.* – СПб.: Питер, 2011. – 400 с. 2. *Tsanas A.* A methodology for the analysis of medical data. Chapter 7 in *Handbook of Systems and Complexity in Health* / *A. Tsanas, M.A. Little, P.E. McSharry* // Springer. – 2013. – P. 113-125. 3. *Duy Ngo* An exploratory data analysis of electroencephalograms using the functional boxplots approach / *Duy Ngo, Ying Sun, M. G. Genton, J. Wu, R. Srinivasan, S.C. Cramer and H. Ombao* // *Frontiers in Neuroscience.* – 2015. – Vol. 9. – P. 1-18. 4. *Hasegawa J.* Current status of pregnancy-related maternal mortality in Japan: a report from the Maternal Death Exploratory Committee in Japan / *J. Hasegawa, A. Sekizawa, H. Tanaka, et al.* // *BMJ Open.* – 2016. – Vol. 79. – Issue 3. – P. 1835-1840. 5. *Мерцалова О. В.* Перинатальні гіпоксичні ураження центральної нервової системи плода у вагітних високого ризику (діагностика, прогноз виходів, оптимізація ведення вагітності та пологів) : Дис... д-ра наук: 14.01.01. – Харків. – 2002. – 40 с. 6. *Martinez-Biarge, M.* Antepartum and intrapartum factors preceding neonatal hypoxic-ischemic encephalopathy / *Martinez-Biarge, M., Diez-Sebastian, J., Wusthoff, et al.* // *Pediatrics.* – 2013. – Vol. 132. – P. 952-959. 7. *Milsom I.* Influence of maternal, obstetric and fetal risk factors on the prevalence of birth asphyxia at term in a Swedish urban population / *I. Milsom, L. Ladfors, K. Thiringer, et al.* // *Acta Obstet Gynecol Scand.* – 2002. – Vol. 81. – P. 909-917. 8. *Bell M.L.* Handling missing data in RCTs; a review of the top medical journals / *M.L. Bell, M. Fiero, N.J. Horton and Hsu Chiu-Hsieh* // *BMC Medical Research Methodology.* – 2014. 9. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions – Version 5.1.0* [Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: http://www.cochrane.org/front_page.htm](http://www.cochrane.org/front_page.htm) – 10.08.2016 р. 10. *Sauro J.* 7 Ways To Handle Missing Data – 2015 [Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: http://www.measuringu.com/blog/handle-missing-data.php](http://www.measuringu.com/blog/handle-missing-data.php) – 10.08.2016 р. 11. *Descriptive Statistics and Exploratory Data Analysis – 2008* [Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: http://www.gs.washington.edu/academics/courses/akey/56008/lecture/lecture2.pdf](http://www.gs.washington.edu/academics/courses/akey/56008/lecture/lecture2.pdf) – 10.08.2016 р. 12. *Stark P.B.* Selected by the Scout Report for Business and Economics – 2013 [Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: http://www.stat.berkeley.edu/~stark/SticiGui/Text/location.htm](http://www.stat.berkeley.edu/~stark/SticiGui/Text/location.htm) – 10.08.2016 р. 13. *McDonald J.H.* Handbook of biological statistics / *McDonald J.H.* // Baltimore: Sparky House Publishing, 2008. – 291 p. 14. *Term H.* Descriptive Statistics for Research – 2008 [Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: https://www.stats.ox.ac.uk/pub/bdr/IAUL/Course1Notes8.pdf](https://www.stats.ox.ac.uk/pub/bdr/IAUL/Course1Notes8.pdf) – 10.08.2016 р. 15. *Шеломоский В.В.* Математическая статистика – Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: http://www.exponenta.ru/educat/systemat/shelomovsky/lab/lab04.asp](http://www.exponenta.ru/educat/systemat/shelomovsky/lab/lab04.asp) – 10.08.2016 р. 16. *Graham Hole* Research Skills Kruskal-Wallis handout – 2011 [Електронний ресурс] – Режим доступу [www. URL: http://users.sussex.ac.uk/~grahamh/RM1web/Kruskal-Wallis%20Handout2011.pdf](http://users.sussex.ac.uk/~grahamh/RM1web/Kruskal-Wallis%20Handout2011.pdf) – 10.08.2016 р.

References:

1. Nasledov, A.D. (2011), *SPSS 19: professional statistical data analysis*, SPb.: Piter, 400 p.
2. Tsanas, A., Little, M.A., and McSharry, P.E. (2013), "A methodology for the analysis of medical data", in Sturmborg, J.P. and Martin, C.M. (Ed.) *Chapter 7 in Handbook of Systems and Complexity in Health*, Springer, pp. 113-125.

3. Ngo, D., Sun, Y., Genton, M.G., Wu, J., Srinivasan, R., Cramer, S. C., and Ombao, H. (2015), "An exploratory data analysis of electroencephalograms using the functional boxplots approach", *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 9, pp. 1-18.
4. Hasegawa, J., Sekizawa, A., Tanaka, H. et al. (2015), "Current status of pregnancy-related maternal mortality in Japan: a report from the Maternal Death Exploratory Committee in Japan", *Circulation Journal*, Vol. 79, pp. 1835-1840.
5. Mertsalova, O.V. (2002), *Perinatal hypoxic central nervous system of the fetus in high risk pregnant women (diagnosis, prognosis outputs, optimization of pregnancy and childbirth): dissertation: Dis... d-ra med. nauk.*, Harkiv, 40 p.
6. Martinez-Biarge, M., Diez-Sebastian, J., Wusthoff, et al. (2013), "Antepartum and intrapartum factors preceding neonatal hypoxic-ischemic encephalopathy", *Pediatrics*, Vol. 132, pp. 952 – 959.
7. Milsom, I., Ladfors, L., Thiringer, K. et al. (2002), "Influence of maternal, obstetric and fetal risk factors on the prevalence of birth asphyxia at term in a Swedish urban population", *Acta Obstet Gynecol Scand*, Vol. 81, pp. 909- 917.
8. Bell, M. L, Fiero, M., Horton, N. J and Chiu-Hsieh Hsu (2014), "Handling missing data in RCTs; a review of the top medical journals", *BMC Medical Research Methodology*, Vol. 14, pp.
9. Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions – Version 5.1.0 (2011), available at: http://handbook.cochrane.org/front_page.htm
10. Sauro, J. (2015), 7 Ways To Handle Missing Data available at: www.measuringu.com/blog/handle-missing-data.php
11. Descriptive Statistics and Exploratory Data Analysis (2008), available at: www.gs.washington.edu/academics/courses/akey/56008/lecture/lecture2.pdf
12. Stark, P.B. (2013), Selected by the Scout Report for Business and Economics available at: www.stat.berkeley.edu/~stark/SticiGui/Text/location.htm
13. McDonald, J.H. (2008) *Handbook of biological statistics*, Baltimore: Sparky House Publishing, 291 p.
14. Term, H. (2008), Descriptive Statistics for Research available at: www.stats.ox.ac.uk/pub/bdr/IAUL/Course1Notes8.pdf.
15. Shelomovsky, V., "Mathematical statistics" available at: www.exponenta.ru/educat/systemat/shelomovsky/lab/lab04.asp
16. Graham, Hole (2011), Research Skills Kruskal-Wallis handout available at: <http://users.sussex.ac.uk/~grahamh/RM1web/Kruskal-Wallis%20Handoout2011.pdf>
15. Shelomovsky, V.V. *Matemeticheskaya ststistika – [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu* www. URL: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/shelomovsky/lab/lab04.asp> – 10.08.2016.
16. Graham, Hole, (2011), Research Skills Kruskal-Wallis handout –[Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu www. URL: <http://users.sussex.ac.uk/~grahamh/RM1web/Kruskal-Wallis%20Handoout2011.pdf> – 10.08.2016.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. СХУ ім. Даля Рязанцев О.І.

Надійшла (received) 09.08.2016

Skarga-Bandurova Inna, D.Sci.Tech., Assoc. Professor, Professor
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
Avenue 59-a, Central, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: skarga_bandurova@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

Biloborodova Tetyana, PhD student
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
Avenue 59-a, Central, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: beloborodova.t@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7561-7484

УДК 004.67:618.3

Пошуковий аналіз даних для визначення релевантних факторів гіпоксичного ураження плода / Скарга-Бандурова І.С., Білотородова Т.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 102 – 115.

Обґрунтовано актуальність пошукового аналізу даних для вивчення властивостей досліджуваних даних перебігу вагітності. Проведено обробку даних з використанням статистичних, графічних, формальних параметричних та непараметричних методів дослідження. За результатами кластерного аналізу виділено групу факторів, з обґрунтованим значущим впливом на розвиток патології плода. Підтверджено наявність взаємозв'язку між окремими виділеними факторами перебігу вагітності та наявністю досліджуваної патології у новонародженого, для досліджуваного набору даних отримано нові угруповання факторів перебігу вагітності. Ил.: 2. Табл.: 3. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: пошуковий аналіз даних, кластерний аналіз, патологія у новонародженого, угруповання факторів.

УДК 004.67:618.3

Поисковый анализ данных для определения релевантных факторов гипоксического поражения плода / Скарга-Бандуров И.С., Белотородова Т.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 102 – 115.

Обоснована актуальность поискового анализа данных для изучения свойств исследуемых данных течения беременности. Проведена обработка данных с использованием статистических, графических, формальных параметрических и непараметрических методов исследования. По результатам кластерного анализа выделена группа факторов, с обоснованным значимым влиянием на развитие патологии плода. Подтверждено наличие взаимосвязи между отдельными выделенными факторами течения беременности и наличием исследуемой патологии у новорожденного, для исследуемого набора данных получены новые группировки факторов течения беременности. Ил.: 2. Табл.: 3. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: поисковый анализ данных, кластерный анализ, патология у новорожденного, группировка факторов.

UDC 004.67:618.3

Exploratory data analysis to identifying meaningful factors of hypoxic fetal injuries / Skarga-Bandurova I.S., Biloborodova T.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216). – P. 102 – 115.

The study aimed to exploratory data analysis to study the properties of the retrospective data of pregnancy. In this paper, we performed data processing using statistical, graphical, formal parametric and nonparametric methods. The results of cluster analysis highlighted a group of factors with a significant influence on the sound development of the pathology of the newborn. It confirmed the presence of the relationship between the individual factors isolated pregnancy and the presence of the studied disease in the newborn, new grouping factors for the test data were obtained. Figs.: 2. Tabl.: 3. Refs.: 16 titles.

Keywords: exploratory data analysis, cluster analysis, pathology of the newborn, grouping factors.

А.Ю. ТИТОВА, асп. ДонНТУ, Покровськ

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ТЕРМОГРАМИ МОЛОЧНИХ ЗАЛОЗ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕРМОГРАФА

Проаналізовано принципи формування термограм в сучасних системах діагностики онкологічних захворювань молочних залоз на основі термографії та визначені етапи формування теплового зображення. Розроблено аналітичну модель формування термограми молочних залоз жінок та проведено аналіз її адекватності. Л.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: термограма молочних залоз, діагностика онкологічних захворювань, аналітична модель.

Постановка проблеми. Активний розвиток інформаційних технологій діагностики онкологічних захворювань молочної залози (МЗ) сприяє створенню новітніх та ефективних засобів для раннього виявлення та лікування раку. Використання контактної термографії в процесі первинної діагностики захворювань МЗ дає хороші показники виявлення пацієнтів групи ризику [1, 2]. Існуючі комп'ютерні системи реалізують кількісний аналіз температурних показників при відборі термограм з патологічними змінами. Для розвитку даного виду діагностики раку МЗ актуальною задачею являється розробка аналітичної моделі формування термограми на основі перетворення температурних показників контактного термографа для забезпечення можливості візуального аналізу отриманого зображення.

Аналіз літератури. Зараз існує багато різних способів реєстрації температури шкіри та відображення даних у вигляді термограм. Автори [3] створили кругові зображення температурної карти кожної МЗ з ізотермічними лініями та топографічними зонами. В [4] температурна карта МЗ пацієнта після обстеження контактним термографом представлена кольоровими прямокутниками з границями позицій сканера та датчиків чорного кольору. В рамках розвитку контактної об'ємної термографії створено двохвимірне та трьох вимірне теплові зображення, що відображають температурні зміни в тканині МЗ глибиною до 8 см [5]. В [6,7] сформовано кольорове теплове зображення верхньої частина тіла з температурною чутливістю 0,07 °С. Автором [8] визначена роль аналізу термограм, створених на базі мікроболометричної матриці з форматом 384 × 288 елементів в діагностиці гострих параназальних синуситів. В [9] інфрачервоні термограми реєстрували безконтактним термографом зі спектральною чутливістю 8 – 12 мкм, програмне забезпечення

комп'ютерної системи діагностики створило оброблене кольорове зображення грудей.

Термограми, що створюються існуючими системами зазвичай, мають низьку якість зображення, нестандартне розширення, котре значно ускладнює автоматизацію візуальної обробки або додаткові елементи – границі квадрантів та кольорових квадратів, ізотерми, мітки соска, які необхідно вилучати перед подальшою обробкою, тому в даній роботі запропоновано розробити нову модель формування термограми.

Мета дослідження – розробка аналітичної моделі формування термограми на основі перетворення температурних показників термографа в кольорове зображення при створенні інформаційної технології діагностики онкологічних захворювань МЗ.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити етапи формування теплового зображення;
- формалізувати змінні та залежності моделі формування термограми;
- дослідити застосування розробленої моделі на конкретних прикладах.

Матеріали дослідження. Об'єктом дослідження є температурні показники шкіри МЗ, що отримані в процесі обстеження контактним термографом цифровим (КТЦ). В КТЦ сканер представляє собою матрицю інтелектуальних датчиків-термометрів, що дозволяє вимірювати коливання температури з розподільною здатністю 0,06 °С, шляхом послідовного позиціонування даних датчиків на обстежуваних ділянках шкіри [4]. Показання датчиків завжди виводяться у відповідній послідовності та в сукупності дають карту розподілу температури ділянки тіла, котру потрібно обстежити. Масив температур заноситься в файл з розширенням *.tmg, з якого необхідно вилучити потрібну інформацію для подальшого дослідження.

Координатна сітка вихідного файлу складається з чотирьох рядків (Row) та восьми стовбців (Col), що відповідають позиціям сканера при обстеженні. Всі дані розділяються на дві половини, отримані показники для правої МЗ розміщені з нульового по третій стовпець по всім рядкам координатної сітки та лівої МЗ – з четвертого по восьмий стовпець координатної сітки файлу, що розбиваються на однакову кількість полів (квадрантів). Кожна позиція сканера – квадрант даних – відповідає 36 значенням температури шкіри з матриці інтелектуальних датчиків.

Квадранти з температурними даними можуть займати всю координатну сітку, що обумовлено фізіологічними особливостями МЗ пацієнта або мати додаткові квадранти внизу основного зображення МЗ – це окремо зняті температурні показники соска відповідних МЗ.

Квадранти складаються з 36 маленьких квадратів, котрі відповідають температурі з датчиків-термометрів. Все це необхідно враховувати при розробці алгоритму читання даних з вихідного файлу та формування масиву температур. Описана координатна сітка файлу з розширенням *.mmg представлена на рис. 1.

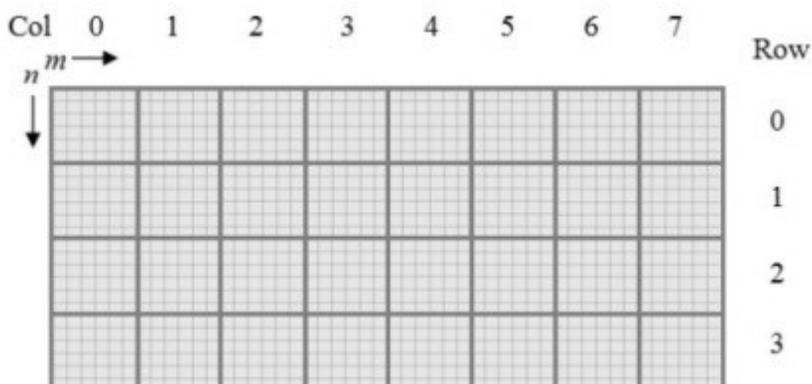


Рис. 1. Координатна сітка файлу з розширенням *.mmg

Як видно з рис. 1, $n, m = \overline{0;6}$ – номери строки та стовпця одного датчика термографа з 36 датчиків однієї позиції сканера, $row = \overline{0;3}$ – кількість позицій сканера по строкам для 36 датчиків термографа, $col = \overline{0;7}$ – кількість позицій сканера по стовпцям для 36 датчиків.

При розробці аналітичної моделі формування термограми запропоновано створити теплове зображення з термограмами правої та лівої МЗ, квадрантами та кольоровими квадратами, що не мають границь. Термограма представляє собою теплове випромінювання шкіри, тому для більшого візуального сприйняття медичним персоналом та пацієнтами необхідно використати кольорову модель RGB для заповнення квадратів кольорами, що відповідають значенням температури з датчиків термографа. Тобто, основна ідея формування теплового зображення – це проєціювання температурних показників в певний кольоровий тон, яким заповнюється кожен з 36 квадратів квадранту термограми.

Для цього слід виконати наступні етапи:

1. Зчитати з файлу з розширенням *.mmg потрібну інформацію.
2. Сформувати масив температур.
3. Розрахувати основні температурні показники.
4. Обрати початкові значення параметрів кольорової моделі HSV.
5. Розрахувати температурний коефіцієнт.
6. Отримати набір нормованих значень кольорового тону.

7. Конвертувати дані в кольорову модель RGB.

8. Намалювати квадрат кольору, що відповідає певному значенню температури кожного з 36 датчиків сканера термографа.

Для вилучення температурних показників з текстового формату файлу з розширенням *.mmg потрібно врахувати всі особливості розміщення даних в координатній сітці файлу.

Потім показники, що відповідають значенням температури ділянки шкіри, послідовно заносяться в масив температур $\{t_{i,j}\}$ з урахуванням кількості квадратів в квадрантах та кількості квадрантів у вихідному файлі, $i = \overline{0;23}$ – номери строк положення датчика (значення температури) в координатній сітці вихідного файлу, $j = \overline{0;47}$ – номери стовпців кожного значення температури в координатній сітці.

Для відповідності показникам температури параметрам кольорової моделі необхідно розрахувати максимальне та мінімальне значення температури з набору температур:

$$t_{\max} = \max_{i,j} \{t_{i,j}\}, \quad i = \overline{0, 23}, \quad j = \overline{0, 47}, \quad (1)$$

де t_{\max} – максимальне значення температури з всіх температурних показників вихідного файлу;

$$t_{\min} = \min_{i,j} \{t_{i,j}\}, \quad i = \overline{0, 23}, \quad j = \overline{0, 47}, \quad (2)$$

де t_{\min} – мінімальне значення температури з набору температур.

В термограмі для малювання маленького квадрату певного кольору палітри RGB необхідно перетворити показники температури, використовуючи спектр кольорової моделі HSV. Відомо, що дана модель описує колірний простір, заснований на трьох характеристиках кольору: колірному тоні (Hue), насиченості (Saturation) і значення кольору (Value) або яскравості (Brightness).

Колірний тон (H) вимірюється від 0 до 360°, значення якого відповідають певному кольору об'єкта, де 120 – зелений, 240 – синій, 355 – червоний. Насиченість (S) – це співвідношення основного тону та рівному йому за яскравістю безбарвного сірого, що вимірюється від 0 до 100% (0 позначає відсутність кольору або відтінок сірого, 100 – насичений колір), чим менше значення насиченості тим складніше визначити колір. Яскравість (V) – вимірюється від 0 до 100%, де 0 позначає чорний колір, а 100 – білий або в будь-якому ступені насичений колір. Виходячи з цього, обрані початкові значення параметрів кольорової моделі, а саме: $S = 100$ – початкове значення насиченості кольору; $V = 100$ – початкове значення яскравості кольору;

$pal_{\max} = 360$ – обране максимальне значення кольорового тону HSV моделі; $pal_{\min} = 120$ – встановлене мінімальне значення кольорового тону кольорової моделі HSV [10].

З урахуванням температурних показників термографа необхідно перерахувати параметри кольорової моделі HSV в значення кожного спектру кольорової моделі RGB на основі вихідних даних. Для цього слід обчислити температурний коефіцієнт, що дозволить провести масштабування значення температури в колір певного тону, за наступною формулою

$$k = (pal_{\max} - pal_{\min}) / (t_{\max} - t_{\min}),$$

де k – температурний коефіцієнт кольорової моделі HSV.

Потім параметр кольорового тону H кожного квадрата термограми треба розрахувати з використанням температурного коефіцієнту для перетворення значень температури в значення кольорового тону на основі формули виду:

$$H_{i,j} = pal_{\min} + (t_{i,j} - t_{\min})k,$$

де $H_{i,j}$ – набір значень кольорового тону всіх квадратів термограми, дані якого відповідають температурним показникам.

Тепер необхідно розрахувати додаткові параметри на основі параметрів кольорової моделі HSV, що використовуються для формування компонент кожного кольору з RGB спектру, за наступними формулами:

$$\begin{cases} H'_{i,j} = (H_{i,j} / 60) \bmod 6, \\ V_{\min} = ((100 - S)V) / 100, \\ a_{i,j} = (V - V_{\min})(H_{i,j} \bmod 60 / 60), \end{cases}$$

де $H'_{i,j}$ – набір нормованих значень кольорового тону, V_{\min} – отримане мінімальне значення яскравості, $a_{i,j}$ – додатково введений параметр.

Останнім етапом формування термограми в запропонованій аналітичній моделі є розрахунок кольорів спектру RGB та малювання квадратів певного кольору. Якщо значення температури з вихідного файлу дорівнює нулю – то це пусті квадрати, що заповнюються сірим кольором. Значення червоної, зеленої та синьо-блакитної складової спектру RGB, позначені відповідно $R_{i,j}$, $G_{i,j}$ та $B_{i,j}$ розраховуються на основі набору нормованих значень кольорового тону таким чином:

$$R_{i,j} = \begin{cases} V, & H'_{i,j} = 0 \text{ або } H'_{i,j} = 5, \\ V_{\min} + a, & H'_{i,j} = 1, \\ V_{\min}, & H'_{i,j} = 2 \text{ або } H'_{i,j} = 3, \\ |V_{\min} - a|, & H'_{i,j} = 4, \end{cases}$$

$$G_{i,j} = \begin{cases} |V_{\min} - a|, & H'_{i,j} = 0, \\ V, & H'_{i,j} = 1 \text{ або } H'_{i,j} = 2, \\ V_{\min} + a, & H'_{i,j} = 3, \\ V_{\min}, & H'_{i,j} = 4 \text{ або } H'_{i,j} = 5, \end{cases}$$

$$B_{i,j} = \begin{cases} V_{\min}, & H'_{i,j} = 0 \text{ або } H'_{i,j} = 1, \\ |V_{\min} - a|, & H'_{i,j} = 2, \\ V, & H'_{i,j} = 3 \text{ або } H'_{i,j} = 4, \\ V_{\min} + a, & H'_{i,j} = 5. \end{cases}$$

Далі необхідно створити функцію малювання квадрата (прямокутника) з використанням програмно-алгоритмічних засобів та розрахованих спектрів кольору RGB. Реалізація всіх етапів аналітичної моделі формування термограм дозволяє отримати теплове зображення, що складається з кольорових квадратів. Проведено дослідження запропонованої аналітичної моделі на 52 файлах з розширенням *.tmg, що показало адекватне перетворення та відображення температурних показників у вигляді термограм, приклад однієї термограми з цього набору представлений на рис. 2.

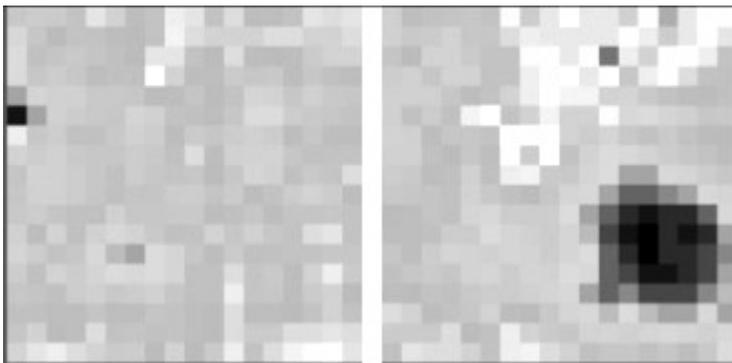


Рис. 2. Термограма з патологією в лівій МЗ

Висновки. В ході дослідження визначені основні етапи формування теплового зображення, формалізовано змінні та залежності

моделі формування термограми на основі перетворення температурних показників термографа, виконано дослідження застосування моделі на конкретних прикладах. Отримані результати свідчать про можливість використання моделі під час формування термограм та їх візуальної обробки в інформаційній технології діагностики онкологічних захворювань МЗ..

Список літератури: 1. *Piana A.* Contemporary evaluation of thermal breast screening / *A. Piana* – *Pan American Journal of Medical Thermology*. – 2014. – №. 1 (2). – P. 93-100. 2. *Дехтярев Ю.П.* Место и роль дистанционной инфракрасной термографии среди современных диагностических методов / *Ю.П. Дехтярев* // *Электроника и связь*. – 2010. – № 2 (55). – С. 192-196. 3. *Павлов А.С.* Применение компьютеризированного радиотермометра РТМ-01-РЭС для выявления пациентов группы риска и для оценки эффективности лечения заболеваний молочных желез [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.resltd.ru/rus/literature/tmp/med_tech.pdf – Дата доступа: декабрь 2016. 4. *Лях Ю.С.* Розробка автоматизованої експертної системи для попередньої скринінгової оцінки даних контактної цифрової термографії / *Ю.С. Лях* // *Університетська клініка*. – 2011. – № 1. – С. 109-112. 5. *Шихман С.М.* Контактная объемная термография молочных желез / *С.М. Шихман* // *Эндоскопическая хирургия*. – 2007. – № 6. – С. 40-44. 6. *Ковальчук И.С.* Возможности дистанционной инфракрасной термографии в диагностике заболеваний молочных желез (доброкачественные изменения) / *И.С. Ковальчук* // *Укр. мед. часопис*. – 2013. – № 3 (92). – С. 165-169. 7. *Котовський В.Й.* Інфрачервона термографія як сучасний метод первинної діагностики / *В.Й. Котовський* // *Біомед. інженерія*. – 2011. – № 1. – С. 38-43. 8. *Карчинський О.О.* Використання дистанційної інфрачервоної термографії в діагностиці гострих параназальних синуситів / *О.О. Карчинський* // *Scientific Journal "ScienceRise: Medical Science"*. – 2016. – № 10 (6) – С. 13-19. 9. *Milosevic M.* Thermography based breast cancer detection using texture features and minimum variance quantization / *M. Milosevic*. – *EXCLI Journal*. – 2014. – Vol. 13. – P. 1204-1215. 10. *Ковалева И.Л.* Получение и обработка изображений [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/1411> – Дата доступа: декабрь 2016.

References:

1. Piana, A. (2014), "Contemporary evaluation of thermal breast screening", *Pan American Journal of Medical Thermology*, No. 1(2), pp. 93-100.
2. Dekhtyarev, Y.P. (2014), "The place and role of remote infrared thermography among modern diagnostic methods", *Electronics and Communications*, No. 2 (55), pp. 192-196.
3. Pavlov, A.S. "The use of computer-RTM-01-RES to identify at-risk patients and to evaluate the effectiveness of treatment of breast", available at: http://www.resltd.ru/rus/literature/tmp/med_tech.pdf (accessed 15 December 2016).
4. Lyakh, Y.E. (2011), "Development of an automated expert system for pre-screening assessment data digital contact thermography", *University Clinic*, No. 1, pp. 109-112.
5. Shykhman, S.M. (2007) "Contact volumetric breast thermography", *Endoscopic surgery*, No. 6, pp. 40-44.
6. Kovalchuk, I.S. (2013), "Features remote infrared thermography in the diagnosis of breast disease (benign changes)", *Ukr. med. magazine*, No. 3 (92), pp. 165-169.
7. Kotovsky, V.I. (2011), "Infrared thermography as a modern method of primary diagnosis", *Biomed. Engineering*, No. 1, pp. 38-43.
8. Karchynskyy, A.A. (2016), "Using remote infrared thermography in the diagnosis of acute paranasal sinusitis", *Scientific Journal "ScienceRise: Medical Science"*, No. 10 (6), pp.13-19.

9. Milosevic, M. (2014), "Thermography based breast cancer detection using texture features and minimum variance quantization", *EXCLI Journal*, Vol. 13, pp. 1204-1215.
10. Kovaleva, I.L. (2008), "Production and processing of images", available at: <http://rep.bntu.by/handle/data/1411> (accessed 16 December 2016).

Статтю представив д-р техн. наук, проф. ДонНТУ Федоров Є.Є.

Надійшла (received) 21.12.2016

Titova Anastasiya, postgraduate
Donetsk National Technical University
square Shybankova, 2, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine
Tel.: (095) 333-51-01, e-mail: a.titova.wk@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4803-2090

УДК 004.932.4

Розробка моделі формування термограми молочних залоз на основі перетворення температурних показників термографа / Тітова А.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 116 – 124.

Проаналізовано принципи формування термограм в сучасних системах діагностики онкологічних захворювань молочних залоз на основі термографії та визначені етапи формування теплового зображення. Розроблено аналітичну модель формування термограми молочних залоз жінок та проведено аналіз її адекватності. Ил.: 2, Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: термограма молочних залоз, діагностика онкологічних захворювань, аналітична модель.

УДК 004.932.4

Разработка модели формирования термограммы молочных желез на основе преобразования температурных показателей термографа / Титова А.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 116 – 124.

Проанализированы принципы формирования термограмм в современных системах диагностики онкологических заболеваний молочных желез на основе термографии и определены этапы формирования теплового изображения. Разработана аналитическая модель формирования термограммы молочных желез женщин и проведен анализ ее адекватности. Ил.: 2, Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: термограмма молочных желез, диагностика онкологических заболеваний, аналитическая модель.

UDC 004.932.4

Developing model of forming breast thermal images on the basis of the transformation by temperature indicators of thermograph / Titova A.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (11216). – P. 116 – 124.

Analyzed the principles of forming thermal image in modern diagnostic systems of breast cancer based on thermography and defined stages of the thermal image. The analytical model of breast thermal image women was created and the analysis of its adequacy. Figs.: 2, Refs.: 10 titles.

Keywords: stages of thermal image, diagnostic systems of breast cancer, analytical model.

*Новые средства информатики,
вычислительной техники и
системный анализ*

И.Ю. ГРИШИН, д-р техн. наук, проф., КубГТУ, Краснодар,
Р.Р. ТИМИРГАЛЕЕВА, д-р экон. наук, проф., КубГТУ, Краснодар,
Р.А. СКИДАН, магистр, КубГТУ, Краснодар,
А.М. РЯБОВ, магистр, КубГТУ, Краснодар

БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ "МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ БАЛЬНЕОЛОГИЧЕСКИХ КУРОРТНЫХ ТЕРРИТОРИЙ"

В базе данных рассматриваются новые подходы к управлению развитием социально-экономических систем разного уровня. База данных представлена в виде реляционной модели и содержит следующие таблицы: данные таблиц базы данных, список глав базы данных, название колонок таблиц базы данных, формулы базы данных, изображения базы данных в BLOB формате, а также их название, список литературы, связь страницы с главами, параграфы базы данных, а также ID страницы и номер параграфа, номера таблиц и их название, туре. База данных предназначена для научных работников, работников органов муниципального и государственного управления, занимающихся проблемами управления развитием социально-экономических систем разного уровня.

Ключевые слова: база данных, управление развитием, социально-экономическая система, реляционная модель, научный работник.

Постановка проблемы. В ходе организации и проведения научных исследований в различных областях знаний собираются, обрабатываются и хранятся большие объемы данных, которые представляют значительную ценность для ученых, занимающихся решением близких или аналогичных научных проблем. Однако в большинстве случаев указанная информация остается недоступной для других исследователей, причем даже наличие большого количества различных электронных библиотек незначительно улучшает ситуацию, поскольку в них размещаются законченные научные и литературные произведения без промежуточных выкладок, доказательств и данных. Поэтому создание инструмента, позволяющего обеспечить других исследователей указанной информацией, способствует более эффективному использованию научных данных и результатов.

Анализ литературы. Проведен анализ наиболее популярных подходов к созданию баз данных (БД) научного назначения. Результаты исследования востребованности полнотекстовых электронных ресурсов в учреждениях Российской Академии наук показали существенное снижение количества ученых, работающих с печатными изданиями, и, наоборот, рост потребности в электронных полнотекстовых базах

научной информации [1 – 3]. При этом обнаружена следующая проблема, которая характерна и для высших учебных заведений, – отсутствие доступа к имеющейся научно-технической информации даже для учреждений науки и образования, расположенных в одном населенном пункте, регионе [4, 5]. При этом ведущаяся в научных и образовательных учреждениях статистика подтверждает, что исследователи неоднократно обращаются к имеющимся в их распоряжении базам данных, иногда до 20 – 25 раз в год, в то же время к БД, имеющихся в соседних научных учреждениях, обращаются очень редко или вообще не обращаются, что объясняется отсутствием информации о таких базах и трудностью доступа к ним. В университетах Западной Европы и США создаются такие базы данных, предназначенные для информационного обеспечения научных исследований, проводимых студентами и профессорско-преподавательским составом [6, 7]. Поэтому возникает задача создания БД для научных целей, которые будут доступны посредством компьютерных телекоммуникаций (локальных или глобальных) [8].

Цель статьи состоит в разработке базы данных для поддержки научных исследований, направленных на ускорение инновационного развития внутренних бальнеологических курортных территорий региона.

Методы и модели. В соответствии с указанными выше требованиями, состоящими в необходимости обеспечения доступности результатов научных исследований для широкого круга ученых, работающих в аналогичной или близких сферах, база данных должна проектироваться с учетом возможности её размещения в глобальной сети Интернет. Поэтому разработка такой БД велась с учетом удобства работы с ней в сети Интернет. В качестве системы управления базой данных была использована MySQL, имевшаяся в распоряжении авторов и достаточно устойчиво работающая с различными операционными системами, установленными на серверах и рабочих станциях, а также со всеми распространенными браузерами.

Разработка базы данных. В распоряжении авторов предоставлены результаты научных исследований, полученные в ходе работы коллектива исследователей на протяжении более года, состоящие в сборе и обобщении статистических данных об основных показателях социально-экономического развития внутренних бальнеологических курортных территорий региона, построении основных экономики-математических моделей на основе разработанных математических методов, формулировании выводов об основных направлениях развития указанных территорий региона.

Состав данных, которые необходимо представить в виде базы данных с помощью СУБД MySQL, включает в себя следующую информацию [9, 10]:

1. Бальнеологические курортные территории как объекты моделирования процессов их инновационного развития.

2. Концептуальные аспекты управления инновационным развитием бальнеологических курортных территорий.

3. Модели и методы управления инновационным развитием бальнеологических курортных территорий.

4. Инновационные подходы к управлению развитием бальнеологических курортных территорий.

Каждый из указанных блоков также содержит большой объем структурированной информации. К примеру 3-й блок включает:

– методологические аспекты моделирования логистических процессов в региональных организационно-экономических системах;

– формирование бизнес-модели инновационного развития предприятия на основе сценарного подхода;

– модель информационного обеспечения организации эффективного управления логистикой туристической отрасли регионов;

– модель распределительной логистики в управлении затратами субъектов хозяйствования.

При проектировании базы данных на основе имеющейся научно-технической информации определены сущности, атрибуты, связи, осуществлена нормализация данных. Осуществлен переход от логической модели представления данных к физической. В результате получена БД, имеющая структуру, представленную на рис. 1.

Видно (рис. 1), что разработанная база данных представлена в виде реляционной модели и содержит следующие таблицы: *cells* (данные таблиц базы данных), *chapter* (список глав базы данных), *columns* (название колонок таблиц базы данных), *formula* (формулы базы данных), *image* (изображения базы данных в BLOB формате, а также их название), *list* (список литературы), *page* (связь страницы с главами), *paragraph* (параграфы базы данных, а также ID страницы и номер параграфа), *tables* (номера таблиц и их название), *type*.

Характеристики некоторых из указанных объектов приведены в виде копии экрана (рис. 2) непосредственно из базы данных, созданной с помощью СУБД MySQL 5.6.

Разработанная база данных наполняется актуальной научно-технической информацией и готовится к размещению на сервере организации или облачном ресурсе в глобальной сети Интернет. Проработаны основные принципы информационной безопасности при работе с рассматриваемым сетевым ресурсом [11, 12].

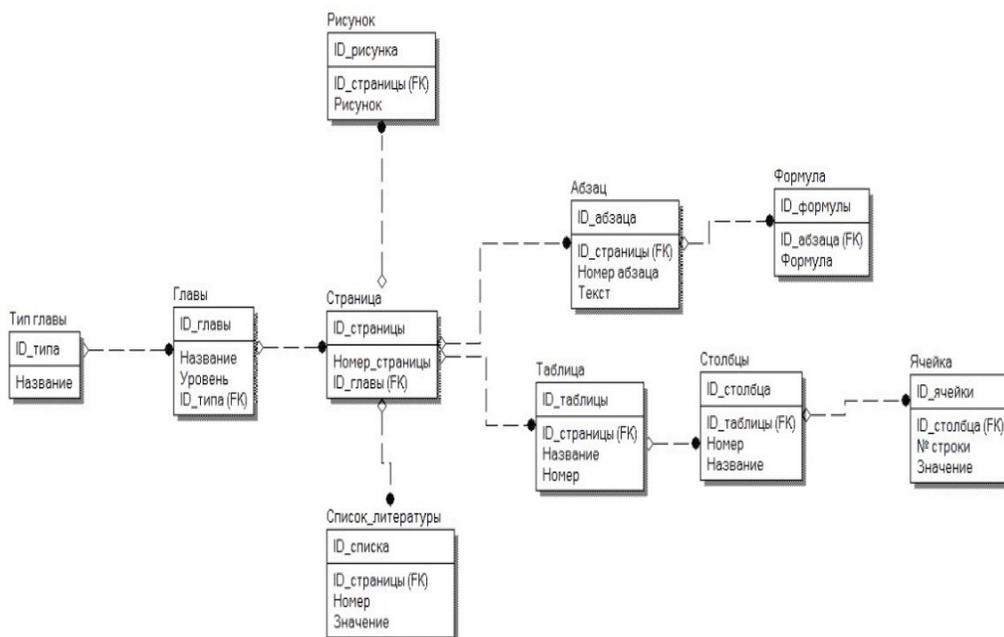


Рис. 1. Структура базы данных

Количественные характеристики основных объектов базы данных приведены на рис. 2.

Имя	Строк	Размер	Создано	Обновлено	Движок	Комментарий	Тип
cells	171	64,0 KiB	2016-09-24 22:44:52		InnoDB		Table
chapter	22	16,0 KiB	2016-09-24 22:44:53		InnoDB		Table
columns	21	16,0 KiB	2016-09-24 22:44:53		InnoDB		Table
formula	0	16,0 KiB	2016-09-24 22:44:53		InnoDB		Table
image	11	1,5 MiB	2016-09-24 22:44:54		InnoDB		Table
list	93	64,0 KiB	2016-09-24 22:44:56		InnoDB		Table
page	97	16,0 KiB	2016-09-24 22:44:57		InnoDB		Table
paragraph	282	288,0 KiB	2016-09-24 22:44:58		InnoDB		Table
tables	0	16,0 KiB	2016-09-24 22:44:59		InnoDB		Table
type	2	16,0 KiB	2016-09-24 22:45:00		InnoDB		Table

Рис. 2. Количественные характеристики базы данных

Характеристики некоторых из указанных объектов приведены в виде копии экрана (рис. 3) непосредственно из базы данных, созданной с помощью СУБД MySQL 5.6.

С помощью разработанной базы данных специалисты органов местного самоуправления и исследователи, занимающиеся вопросами развития бальнеологических курортных территорий (особенно внутренних, не имеющих выхода к морю) могут принимать решение о проведении комплекса мероприятий и условиях инновационного развития указанных территорий.

book.columns: 21 всего строк (приблизительно)

ID_column	ID_table	num_col	name_col
1	1	1	Значение суммарного коэффициента уверенности
2	1	2	Решение относительно возможности реализации вар...
3	2	1	Этапы
4	2	2	Содержание работ
5	3	1	Название
6	3	2	Сущность
7	4	1	CRL
8	4	2	SRL
9	4	3	Специфика транспортных услуг
10	5	1	Блок модели
11	5	2	Проблемы
12	5	3	Основные результаты (выходы блока)
13	6	1	Показатель
14	6	2	X
15	6	3	Y
16	6	4	Z
17	7	1	Направления моделирования
18	7	2	Модели и методы
19	8	1	Критерии соотношения
20	8	2	Стратегическое планирование
21	8	3	Сценарный подход к управлению

Рис. 3. Объекты базы данных

Фрагмент скрипта базы данных, позволяющий поддерживать процесс принятия решений о реализации инноваций приведен на рис. 4.

```
INSERT INTO `cells` (`ID_cell`, `ID_column`, `num_str`, `text`) VALUES
(1, 1, 1, 'Ko = -1,0'),
(2, 1, 2, '-1,0 < Ko ≤ -0,8'),
(3, 1, 3, '-0,8 < Ko ≤ -0,6 '),
(4, 1, 4, '-0,6 < Ko ≤ -0,3'),
(5, 1, 5, '-0,3 < Ko ≤ +0,3'),
(6, 1, 6, '+0,3 < Ko ≤ +0,6'),
(7, 1, 7, '+0,6 < Ko ≤ +0,8'),
(8, 1, 8, '+0,8 < Ko ≤ +0,1'),
```

(9, 1, 9, 'Ко = +1,0'),
(10, 2, 1, 'Реализация невозможна. Условия отсутствуют'),
(11, 2, 2, 'Условия для реализации инноваций практически отсутствуют'),
(12, 2, 3, 'Условий для реализации инноваций почти нет'),
(13, 2, 4, 'Больше решений «за», чем «против»'),
(14, 2, 5, 'Ситуация неопределенности'),
(15, 2, 6, 'Возможности реализации незначительные'),
(16, 2, 7, 'Есть все условия для реализации инноваций'),
(17, 2, 8, 'Практически уверенно можно реализовать инновации'),
(18, 2, 9, 'Все условия для реализации есть')

Рис. 4. Фрагмент SQL скрипта базы данных в СУБД MySQL

Разрабатываются методические рекомендации для применения созданной БД в учебном процессе по направлениям подготовки "Прикладная информатика" и "Менеджмент".

Выводы. Впервые создана база данных для поддержки научных исследований и принятия решений в сфере инновационного развития внутренних бальнеологических курортных территорий, которым до последнего времени уделялось недостаточно внимания, но имеющим большой невостребованный ресурс развития.

Особенностью созданной базы является применение четвертой нормальной формы, поскольку в результате проектирования выявились отношения с многозначными зависимостями, которые встречаются очень редко при проектировании и создании аналогичных баз данных.

Предложен подход к свободному распространению научно-технической информации в глобальной сети Интернет. Разработанная база данных представлена в виде реляционной модели и содержит десять реляционных таблиц. Показано, что наиболее удобной для реализации указанной базы данных является СУБД MySQL.

В ходе дальнейшей работы требуется уточнить вопросы технической реализации размещения созданной базы данных на одном из глобальных облачных ресурсов для свободного доступа исследователей региона, а также студентов вузов соответствующего профиля подготовки.

Список литературы: 1. Основные цифровые показатели работы библиотеки в 2015 г.: отчет о проделанной работе (ежегод.) / Рос. акад. наук; Ин-т физики полупроводников, б-ка. – Новосибирск, 2015. – 9 с. 2. Организационно-технологическая документация ГПНТБ СО РАН. Система электронных каталогов и баз данных / Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – Новосибирск, 2005. – 50 с. 3. Лаврик О.Л. Академическая библиотека в современной информационной среде / О.Л. Лаврик. – Новосибирск, 2013. – 251 с. 4. Шабурова Н.Н. Анализ использования полнотекстовых баз данных в информационно-библиотечном обслуживании научных исследований / Н.Н. Шабурова // Библиосфера. – 2006. – № 2. – С. 7-12. 5. Åström F. How implementation of bibliometric practice affects the role of academic libraries / F. Åström and J. Hansson // Journal of Librarianship and Information Science. – 2013. – Vol. 45. –

№. 4. – P. 316-322. DOI: 10.1177/09610006124 56867. **6. Bladek M.** Biblometrics Services and the academic library: meeting the emerging needs of the campus community / *M. Bladek* // *College & Undergraduate Libraries*. – 2014. – Vol. 21. – Iss. 3-4. – P. 330-344. DOI:10.1080/10691316. 2014. 929066. **7. MacColl J.** Library roles in university research assessment / *J. MacColl*. – *Liber Quarterly*. – 2010. –Vol. 20. – №. 2. – P. 152-168. **8. Тимиргалеева Р.Р.** Формирование концепции информационного обеспечения управления развитием бальнеологических курортных территорий краснодарского края / *Р.Р. Тимиргалеева, И.Ю. Гришин* // *NovalInfo.Ru*. – 2016. – Т. 4. – № 47. – С. 6743. **9. Гришин И.Ю.** Управление предприятиями туристско-рекреационной сферы на основе внутреннего маркетинга / *И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, М.А. Шостак*. – ИТ "Ариал". – 2015. – 307 с. **10. Тимиргалеева Р.Р.** Моделирование и структуризация системы управления предприятиями курортно-рекреационной сферы на основе элементов теории нейронных сетей: основы методологии / *Р.Р. Тимиргалеева, И.Ю. Гришин* // *Статистика и Экономика*. – 2015. – № 3. – С. 217-220. **11. Гришин И.Ю.** Анализ перспективных подходов к проектированию систем безопасности распределенных компьютерных сетей / *И.Ю. Гришин* // *Вестник Российского нового университета*. – 2015. – № 10. – С. 36-40. **12. Bodnar A.A.** Information technologies - the efficient management basis of high educational institution / *A.A. Bodnar, I.Yu. Grishin, B.S. Ahmetov* // *Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Філософія. Політологія*. – 2010. – № 94-96. – С. 44-50.

References:

1. "Key indicators of the digital library in 2015" (2015), Progress Report (ezhegod.). Ros. Acad. Sciences, Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, 9 p.
2. "Organizational and technological documentation SPSTL. The system of electronic catalogs and databases" (2005), State. publischen. scientific and engineering. Sib. Dep-of Ros. Acad. Sciences. Novosibirsk, 2005, 50 p.
3. Lavrik, O.L. (2013), *Academic Library in the modern information environment*, Novosibirsk, 251 p.
4. Shaburova, N.N. (2006), "Analysis of the use of full-text databases in information and library services research", *Bibliosphere*. No 2, pp. 7-12.
5. Åström, F. and Hansson, J. (2013), "How implementation of bibliometric practice affects the role of academic libraries", *Journal of Librarianship and Information Science*. Vol. 45, No. 4, pp. 316-322. DOI: 10.1177/09610006124 56867.
6. Bladek, M. (2014), "Biblometrics Services and the academic library: meeting the emerging needs of the campus community", *College & Undergraduate Libraries*, Vol. 21, Iss. 3-4. pp. 330-344. DOI:10.1080/10691316. 2014. 929066.
7. MacColl, J. (2010), "Library roles in university research assessment", *Liber Quarterly*, Vol. 20, No. 2, pp. 152-168.
8. Timirgaleeva, R.R. and Grishin, I.Yu. (2016), "Formation of the concept of information management software development balneological resorts Krasnodar Territory", *NovalInfo. Ru.*, Vol. 4, No 47, p. 6743.
9. Grishin, I.Yu., Timirgaleeva, R.R. and Shostak, M.A. (2015), *Enterprise management of tourist and recreation areas on the basis of internal marketing*, ИТ "Ариал", 307 p.
10. Timirgaleeva, R.R. and Grishin, I.Yu. (2015), "Modeling and structuring of a control system of resort and recreational sphere based on the elements of the theory of neural networks: the basics methodology", *Statistics and Economics*, No 3, pp. 217-220.
11. Grishin, I.Yu. (2015) "Analysis of promising approaches to the design of safety systems distributed computer networks", *Journal of Russian New University*, No 10, pp. 36-40.

12. Bodnar, A.A., Grishin, I.Yu. and Ahmetov, B.S. (2010), "Information technologies - the efficient management basis of high educational institution", *Bulletin of Kyiv National University. Taras Shevchenko. Philosophy. Politology*, No 94-96, pp. 44-50.

Работа выполняется при поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края (проект – 16-46-230121).

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 18.11.2016

Grishin Igor, Dr. Sci. Tech., Professor
Professor at the Department of Computer Technology and Information Security
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 140-57-55, e-mail: igugri@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5839-1858

Timirgaleeva Rena, Dr.Sci. Econ., Professor
Professor at the Department of Industrial Management
and Economics Industries of National Economy
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 805-47-96, e-mail: renatimir@gmail.com

Roman Skidan, master
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 140-57-55, e-mail: igugri@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5839-1858

Arkady Ryabov, master
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 140-57-55, e-mail: igugri@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5839-1858

УДК 004.65

База даних для проведення наукових досліджень "Моделювання процесів інноваційного розвитку бальнеологічних курортних територій" / Грішин І.Ю., Тіміргалєєва Р.Р., Скідан Р.А., Рябов А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 126 – 134.

У базі даних розглядаються нові підходи до управління розвитком соціально-економічних систем різного рівня. База даних представлена у вигляді реляційної моделі і містить наступні таблиці: дані таблиць бази даних, список глав бази даних, назва колонок таблиць бази даних, формули бази даних, зображення бази даних, список літератури, зв'язок сторінки з главами, параграфи бази даних, номери таблиць і їх назва. База даних призначена для науковців, працівників органів муніципального та державного управління, що займаються проблемами управління розвитком соціально-економічних систем різного рівня. Іл.: 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: база даних, управління розвитком, соціально-економічна система, реляційна модель, науковець.

УДК 004.65

База данных для проведения научных исследований "Моделирование процессов инновационного развития бальнеологических курортных территорий" / Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Скидан Р.А., Рябов А.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 126 – 134.

В базе данных рассматриваются новые подходы к управлению развитием социально-экономических систем разного уровня. База данных представлена в виде реляционной модели и содержит следующие таблицы: данные таблиц базы данных, список глав базы данных, название колонок таблиц базы данных, формулы базы данных, изображения базы данных в BLOB формате, а также их название, список литературы, связь страницы с главами, параграфы базы данных, а также ID страницы и номер параграфа, номера таблиц и их название, type. База данных предназначена для научных работников, работников органов муниципального и государственного управления, занимающихся проблемами управления развитием социально-экономических систем разного уровня.

Ключевые слова: база данных, управление развитием, социально-экономическая система, реляционная модель, научный работник.

UDC 004.65

The database for research "Modelling of processes of innovation development of the balneological resort territories"/ Grishin I.Yu., Timirgaleeva R.R., Skidan R.A., Ryabov A.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 44 (1216). – P. 126 – 134.

The database are considered new approaches to the management of the development of socio-economic systems of different levels. The database is presented in the form of a relational model and contains the following tables: data tables in the database, the heads of the database list, the name of the column database tables, formulas, database, image database, reference list, the link of the page with the heads, database paragraphs, tables, numbers and their name. The database is intended for scientists, employees of municipal and public administration dealing with management of the development of socio-economic systems of different levels. Figs.: 2. Refs.: 12 titles.

Keywords: database, development management, socio-economic system, relational model, scientist.

К.В. ЗАЩЕЛКИН, канд. техн. наук, доц., ОНПУ, Одесса,
Е.Н. ИВАНОВА, ст. преп., ОНПУ, Одесса

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ F5 К СРЕДЕ LUT-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

Рассмотрены подходы к контролю информационных объектов при помощи технологии цифровых водяных знаков. Предложен метод внедрения цифрового водяного знака в информационные контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой. Метод основан на использовании композиции известного метода F5, применяемого для контроля мультимедийных информационных объектов, и подходов к внедрению дополнительной информации в LUT-ориентированные контейнеры. Ил. 3. Библиогр. 17 назв.

Ключевые слова: контроль информационных объектов, цифровые водяные знаки, метод F5, LUT-ориентированные контейнеры.

Постановка проблемы. Технология цифровых водяных знаков (ЦВЗ) представляет собой подход к скрытому внедрению данных в информационный контейнер с целью контроля его целостности или легитимности использования. Технологии ЦВЗ основаны на применении стеганографических приемов [1], в рамках которых скрывается факт наличия ЦВЗ в информационном объекте (контейнере ЦВЗ). ЦВЗ может быть считан из контейнера при наличии стеганографического ключа (стега-ключа), определяющего правила доступа к элементам ЦВЗ.

В современных информационных системах ЦВЗ получили широкое распространение для контроля мультимедийного контента [2]: растровых графических файлов, видеофайлов, оцифрованного звука. Существенная особенность файлов-контейнеров для такого контента состоит в том, что все они являются *пассивными* информационными объектами, выполняющими только функцию хранения данных. Очевидно, что необходимость в подобном контроле использования и целостности информационных объектов не ограничивается только контейнерами данного вида. Такая необходимость имеет место и для *активных* информационных объектов, выполняющих некоторую вычислительную или управляющую функцию.

Исследования подходов к применению технологий ЦВЗ в отношении немультимедийных *активных* стего-контейнеров – информационных объектов, выполняющих определенную вычислительную или управляющую функцию, находятся сейчас на начальной стадии. В рамках таких подходов, например, предлагается

использовать в качестве стего-контейнеров для внедрения ЦВЗ, а также для задач скрытого хранения и пересылки защищенной информации, исполняемые файлы [3, 4] или исходные коды программ [5, 6] для вычислительных систем.

Анализ литературы. В работах [7 – 9] были предложены и развиты методы внедрения данных в стего-контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой (LUT – Look Up Table – таблица поиска), отличающиеся от традиционных контейнеров тем, что являются *активными* информационными объектами, состоящими из *неавтономных* элементарных единиц, данные в которых представлены *точно*. К таким контейнерам относятся, например, микросхемы FPGA (Field Programmable Gate Array) [10], являющиеся, на текущий момент, весьма используемой элементной базой для построения компьютерных и управляющих систем. Основным элементом таких контейнеров выступают блоки LUT, которые представляют собой структуру данных, используемую с целью замены вычислений на операции поиска заготовленных данных [11]. Блоки LUT в FPGA обычно представлены в виде одноразрядной оперативной памяти. Входы блока LUT при этом являются адресными входами такой памяти. При количестве входов, равном n , блок LUT хранит в себе 2^n бит информации и способен выполнить вычисление значения одной n -аргументной булевой функции.

Одним из эффективных подходов к внедрению ЦВЗ в мультимедийные информационные контейнеры является использование совместно с классическими стеганографическими приемами теории помехоустойчивого кодирования [12]. Методы внедрения ЦВЗ, использующие такой подход отличаются низкими значениями отношения количества искаженных (в результате внедрения) элементарных единиц контейнера к общему количеству элементарных единиц. Наиболее широкое применение среди таких методов, получил метод F5 [12 – 14] и его модификации. Этот метод сочетает технику синдромного декодирования вместе с традиционными подходами к внедрению ЦВЗ. Однако указанный подход пока не распространен на существующие методы встраивания ЦВЗ в информационные контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой.

Цель данной работы состоит в развитии методов встраивания ЦВЗ в информационные контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой путем адаптации метода F5 к среде указанных контейнеров.

Основная часть. Предлагаемый в данной работе метод является композицией подходов известного метода F5 [12 – 14] в части использования синдромного декодирования и методов, предложенных

авторами данной статьи в работах [7 – 9] в части встраивания ЦВЗ в LUT-ориентированные контейнеры.

Последовательность действий классического метода F5 [14] состоит в следующем. Встраиваемая в контейнер двоичная последовательность разрядов ЦВЗ разделяется на m -разрядные двоичные векторы. Каждый из таких векторов рассматривается как синдром ошибки S_i^* для (n, k) -кода Хемминга с заданной проверочной матрицей \mathbf{H} . Рабочая область контейнера ЦВЗ интерпретируется как последовательность n -разрядных векторов a_i , обладающих синдромом ошибки S_i , полученным по той же проверочной матрице \mathbf{H} . Процедура встраивания ЦВЗ в соответствии с методом F5 заключается в замене синдромов векторов контейнера S_i на синдромы S_i^* ЦВЗ.

Предлагаемая адаптация данного метода к среде LUT-контейнеров предполагает следующие исходные данные, для реализации метода:

1) $M = (m_1, m_2, \dots, m_r)$ – двоичная последовательность ЦВЗ, подлежащая встраиванию в контейнер;

2) LC – контейнер с LUT-ориентированной архитектурой, реализующий некоторую вычислительную или управляющую функцию;

3) $key = (set, coding, order)$ – ключ для внедрения и извлечения ЦВЗ, где set – номер (адрес) разряда LUT, в который выполняется внедрение бита последовательности ЦВЗ;

$coding = (n, k, ERule)$ – формальное описание принципов используемого помехоустойчивого кодирования: n, k – параметры помехоустойчивого (n, k) -кода, n – длина кодового слова, k – количество информационных разрядов в кодовом слове; $ERule$ – правило выполнения синдромного декодирования (может быть представлено проверочной матрицей \mathbf{H} блочного кода или иным описанием процедуры получения синдрома ошибки);

$order$ – правило, задающее стего-путь – порядок обхода блоков LUT в контейнере для выполнения встраивания или извлечения информации.

Результат применения предлагаемого метода – LUT-контейнер LC^* , в который внедрена последовательность M . При этом функционирование контейнера LC^* , выражающееся в выполнении его целевой функции, не должно отличаться от функционирования контейнера LC , структура и параметры у контейнеров LC^* и LC также не должны отличаться.

Последовательность действий предлагаемого метода внедрения данных в LUT-ориентированный контейнер состоит из семи этапов.

Этап 1. Рабочая область LUT-контейнера определяется стего-путем, образованным парами последовательно соединенных блоков LUT, что определяется принципами, предложенными в работах [7 – 9].

Этап 2. Полученный стего-путь разделяется на сегменты по n пар блоков LUT (параметр n является одним из компонентов стего-ключа key).

Етап 3. Для каждой из полученных на предыдущем этапе пар блоков выполняется считывание значения разряда с номером set из внутреннего двоичного кода первых блоков пар. Совокупность полученных таким образом n разрядов каждого из сегментов стего-пути рассматривается как последовательность n -разрядных векторов a_i .

Етап 4. Для каждого из двоичных векторов a_i , полученных на предыдущем этапе, определяется синдром ошибки S_i . Синдром определяется в соответствии с правилом синдромного декодирования $ERule$, заданным стего-ключем.

Етап 5. Определяется количество контрольных разрядов используемого кода $m = n - k$. Двоичная последовательность, подлежащая встраиванию в контейнер $M = (m_1, m_2, \dots, m_r)$ разбивается на сегменты по m разрядов. Каждый из полученных сегментов интерпретируется как синдром ошибки S_i^* для (n, k) -кода, который (синдром) определяется по тем же правилам $ERule$, что и на этапе 4.

Етап 6. Непосредственно процедура встраивания информации ЦВЗ представляет собой последовательное внедрение сегментов скрываемой двоичной последовательности S_i^* (полученных на этапе 5) в двоичные вектора a_i , полученные на этапе 3. Такое внедрение достигается заменой каждого вектора a_i , имеющего синдром S_i , на вектор a_i^* , имеющий синдром S_i^* . Для выполнения указанной замены векторов текущий (S_i) и требуемый (S_i^*) синдромы суммируются по модулю два: $P_i = S_i \oplus S_i^*$. Полученное значение P_i задает вектор ошибки e_i с весом Хемминга $w(e_i) = 1$. Для кода Хемминга P_i соответствует единственному столбцу проверочной матрицы H кода, порядковый номер которого задает номер единичного разряда в векторе ошибки e_i .

Етап 7. Изменение значения двоичного вектора i -го сегмента стего-пути ($a_i^* = a_i \oplus e_i$) производится в соответствии с правилами, изложенными в работах [7 – 9], которые базируются на принципах эквивалентных преобразований на множестве пар последовательно подключенных блоков LUT, предложенных в работах [15, 16]. Такое изменение достигается путем выполнения двух действий в отношении блока LUT, содержащего разряд вектора a_i который подвергается изменению: а) инвертирования внутреннего кода текущего обрабатываемого блока LUT; б) выполнения распространения инверсии на входы всех блоков LUT, подключенных к выходу текущего блока. Второе из указанных действий компенсирует изменения кода блока LUT, выполненные в ходе первого действия.

Рассмотрим пример выполнения указанных этапов предлагаемого метода внедрения ЦВЗ в LUT-ориентированный контейнер. Исходные данные примера:

- двоичная последовательность ЦВЗ, которую необходимо внедрить в контейнере $M = 011001010\dots$;
- номер (адрес) разряда LUT, в который выполняется внедрение битов последовательности ЦВЗ $set = 5$;
- параметры применяемого помехоустойчивого кода: $n = 7, k = 4$;
- правило выполнения синдромного декодирования представлено в виде проверочной матрицы \mathbf{H} кода Хемминга:

$$ERule = \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для указанных исходных данных, процесс выполнения предложенного метода состоит в следующем.

Этап 1. Пусть для данного примера стега-пути, определяемый компонентом стега-ключа *order* устанавливает последовательность блоков LUT, представленную на рис. 1. Для компактности изложения показано начало этой последовательности, состоящее из восьми блоков LUT первого уровня: $LUT_{1.1} - LUT_{1.8}$. Каждый из блоков LUT первого уровня подключен к одному из блоков LUT второго уровня: $LUT_{2.1} - LUT_{2.4}$ (требование ограничений, определенных в работах [7, 9]).

Этап 2. Поскольку по условиям данного примера для внедрения ЦВЗ используется (n, k) -кода Хемминга с параметром $n = 7$, разбиваем последовательность блоков LUT, входящих в стега-путь на сегменты по семь пар блоков LUT в каждом. Для данного примера в первый сегмент входят следующие семь пар блоков:

$$\text{Сегмент 1} = ([LUT_{1.1}, LUT_{2.1}], ([LUT_{1.2}, LUT_{2.2}], ([LUT_{1.3}, LUT_{2.2}], [LUT_{1.4}, LUT_{2.2}], [LUT_{1.5}, LUT_{2.3}], [LUT_{1.6}, LUT_{2.4}], [LUT_{1.7}, LUT_{2.4}]).$$

Этап 3. Из кода первого блока, каждой из полученных семи пар блоков считываем значение разряда с номером *set*, который по условиям данного примера равен 5. На рис. 1 все разряды с порядковым номером 5 в кодах блоков LUT первого уровня показаны выделением. Совокупность выделенных разрядов образует двоичный вектор $a_1 = 0101110$.

Этап 4. Используя проверочную матрицу \mathbf{H} , заданную компонентом стега-ключа *ERule* находим синдром ошибки S_i для вектора a_1 , полученного на предыдущем этапе: $S_1 = a_1 \cdot \mathbf{H}^T = 101$.

Этап 5. Определяем количество контрольных разрядов используемого кода $m = n - k$. Для заданных по условиям примера параметров $n = 7, k = 4$ параметр m имеет значение 3. Двоичную последовательность ЦВЗ $M = 011001010\dots$ разбиваем на сегменты по m разрядов: $M = 011|001|010|\dots$. Далее из-за ограниченности объема

примера, покажем встраивание в LUT-контейнер только первого трехразрядного сегмента ЦВЗ "011".

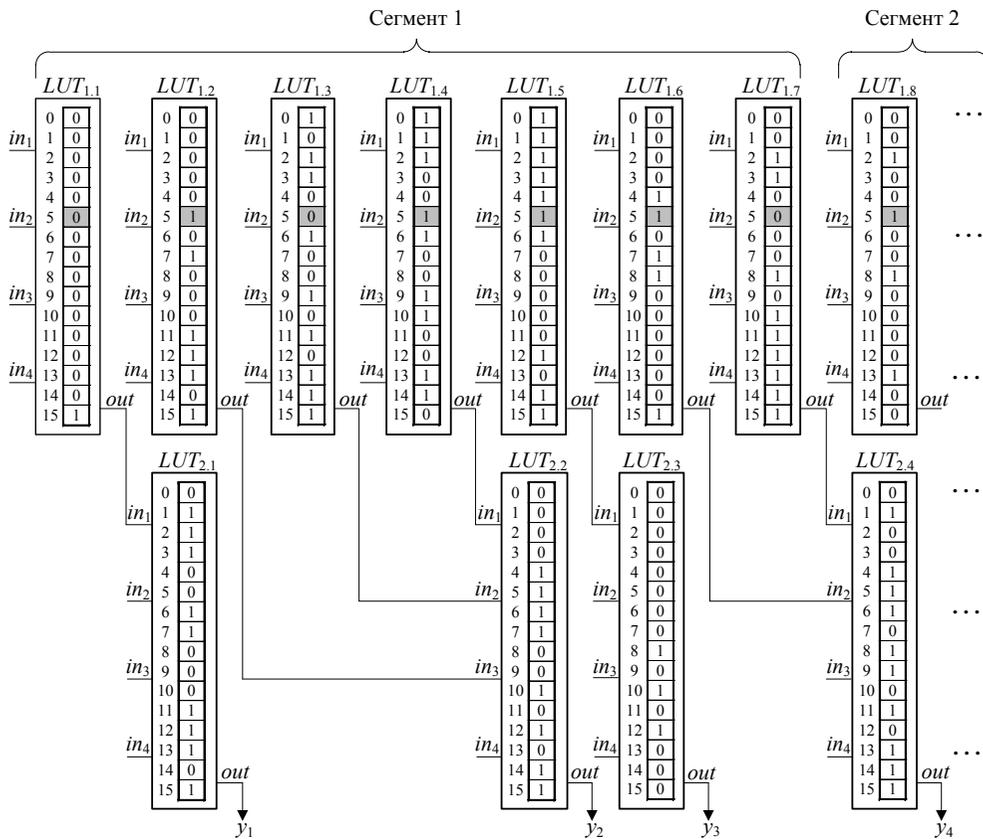


Рис. 1. Пример фрагмента LUT-контейнера до встраивания ЦВЗ

Этап 6. Для встраивания первого сегмента ЦВЗ "011" в контейнер необходимо в векторе $a_1 = 0101110$ заменить текущий синдром $S_1 = 101$ на синдром, определяемый значением сегмента ЦВЗ $S^*_1 = 011$. Для этого следует получить вектор ошибки e_1 , который, будучи наложенным на вектор a_1 , изменит его синдром с S_1 на S^*_1 . Суммируем текущий и требуемый синдромы поразрядно по модулю два $P_1 = S_1 \oplus S^*_1 = 110$. Полученное значение P_1 задает вектор ошибки e_1 с весом Хемминга $w(e_i) = 1$. P_1 соответствует единственному столбцу проверочной матрицы \mathbf{H} кода, порядковый номер которого задает номер единичного разряда в векторе ошибки e_1 . Значение $P_1 = 110$ совпадает со значением предпоследнего (6-го) столбца проверочной матрицы \mathbf{H} (вес разрядов в столбце матрицы возрастает в направлении сверху-вниз). Это означает, что вектор ошибки содержит единицу в предпоследнем разряде и имеет вид $e_1 = 0000010$. Таким образом, для внедрения сегмента ЦВЗ "011" в

контейнер необхідно інвертувати предпоследний разряд вектора $a_1 = 0101110$ с тем, чтобы получить вектор $a^*_1 = a_1 \oplus e_1 = 0101100$. Действительно, вектор $a^*_1 = 0101100$, который отличается от исходного вектора $a_1 = 0101110$ только в одном (предпоследнем) разряде, имеет синдром ошибки $S_1 = a^*_1 \cdot H^T = 011$, совпадающий со значением сегмента ЦВЗ, который необходимо встроить в контейнер.

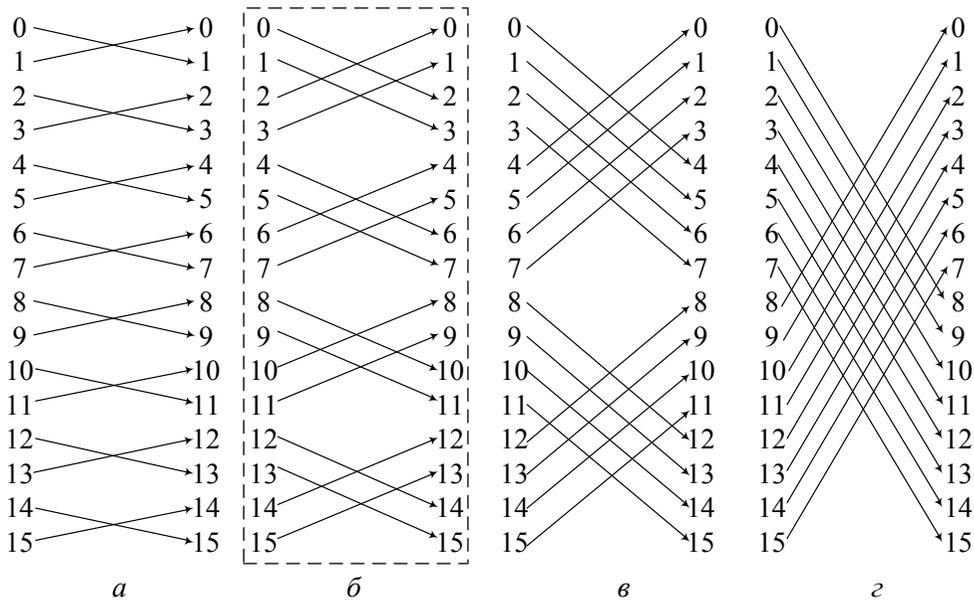


Рис. 2. Принцип выполнения перестановок значений разрядов кода в процессе распространения инверсии на входы 4-х входного блока LUT
 а – распространение на вход с весом 1; б – распространение на вход с весом 2;
 в – распространение на вход с весом 4; г – распространение на вход с весом 8

Этап 7. На предыдущем этапе было установлено, что для встраивания сегмента ЦВЗ "011" в LUT-контейнер, необходимо в предпоследнем (6-м) разряде вектора a_1 значение 1 поменять на значение 0. Этот разряд находится в LUT-контейнере кода блока $LUT_{1,6}$ по адресу $set = 5$ (рис. 1). Изменение значения этого разряда в блоке LUT выполняем в соответствии с правилами, изложенными в работах [7 – 9] т.е. путем инвертирования внутреннего кода текущего обрабатываемого блока LUT и выполнения распространения инверсии на входы всех блоков LUT, подключенных к выходу текущего блока. В данном примере весь код блока $LUT_{1,6}$ инвертируется. Для компенсации этой инверсии разряды кода блока $LUT_{2,4}$, подключенного к выходу блока $LUT_{1,6}$ меняются местами в соответствии со следующим принципом. В схеме, изображенной на рис. 1, входы блоков LUT имеют двоичные веса,

пропорциональные величине номера входа, т.е. вход in_1 имеет вес 1, вход in_2 – вес 2, вход in_3 – вес 4 и вход in_4 – вес 8. Блок $LUT_{1,6}$ подключен к входу in_2 блока $LUT_{2,4}$, который имеет вес 2. Таким образом, необходимо распространить инверсию блока $LUT_{1,6}$ на вход блока $LUT_{2,4}$ с весом 2. Такое распространение инверсии выполняется путем перестановки между собой, рядом расположенных пар разрядов кода (рис. 2, б).

На рис. 2 показаны принципы перестановок разрядов кодов блока LUT в ходе распространения инверсии на различные входы блока. Вариант, рассматриваемый в данном примере, показан выделением.

Результирующий вид фрагмента LUT-контейнера с встроенным в него сегментом ЦВЗ "011" показан на рис. 3.

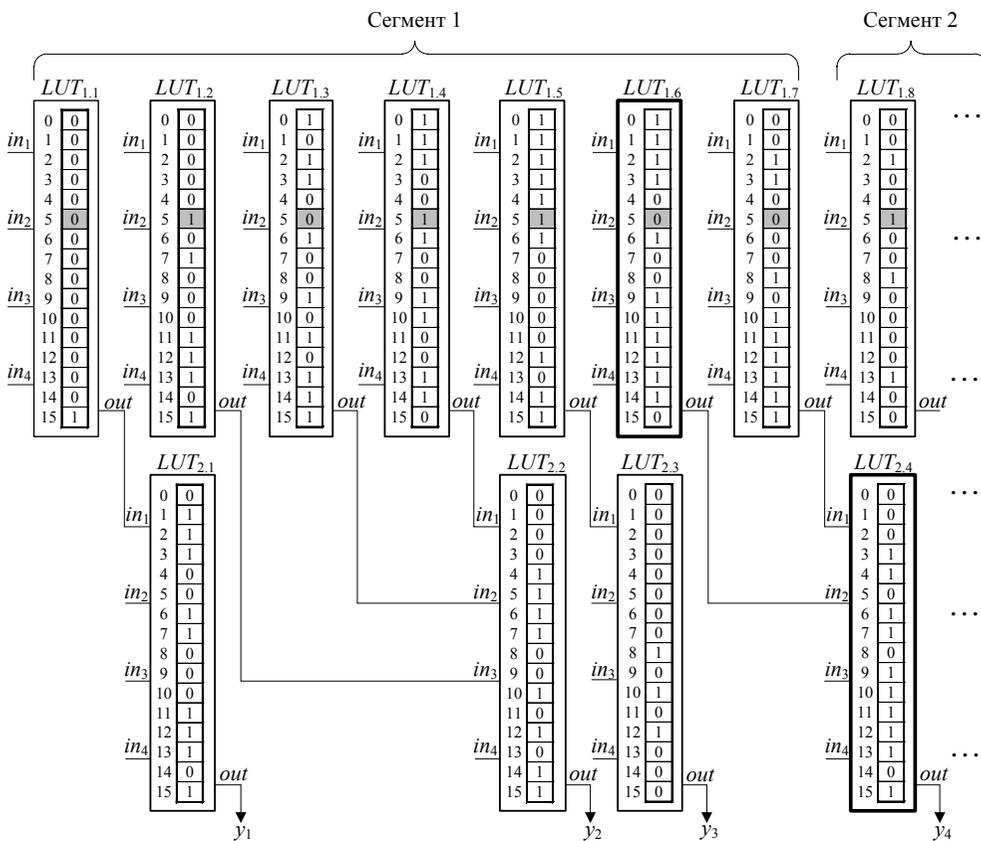


Рис. 3. Фрагмент LUT-контейнера после встраивания в него ЦВЗ

В результате встраивания ЦВЗ структура контейнера осталась неизменной. Были заменены коды только одной из семи пар блоков LUT, находящихся в первом сегменте стега-пути (указанная пара блоков показана на рис. 3 выделением). Это позволило скрыть в данный сегмент трехразрядную часть кода ЦВЗ. Функционирование контейнера при этом

не претерпело изменений. Модификация кодов блоков $LUT_{1,6}$ и $LUT_{2,4}$ не привела к изменению целевой функции контейнера и, в частности, к изменению поведения контейнера по выходу u_4 .

Выводы. Предложенный в работе метод позволяет выполнять внедрение ЦВЗ в контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой. Метод основан на композиции методов внедрения ЦВЗ в LUT-контейнеры, предложенных авторами данной работы и известного метода F5, ориентированного на работу с пассивными мультимедийными контейнерами. Предложенный метод не меняет связи блоков LUT между собой в пределах контейнера, однако выполняет эквивалентные преобразования значений кодов отдельных блоков. Такие эквивалентные изменения кодов не изменяют целевую функцию LUT-контейнера и, как было показано в работе [17], не влияют на его основные параметры. Предложенный метод отличается от существующих методов встраивания ЦВЗ в LUT-контейнеры низким значением показателя отношения количества изменяемых (в результате встраивания) блоков LUT контейнера к общему количеству блоков. Так в рассмотренном в работе примере для внедрения в контейнер трехразрядного сегмента ЦВЗ понадобилось внести изменения только в одну из семи пар блоков LUT, входящих в сегмент стега-пути.

Предложенный метод может найти применение при разработке аппаратно-программного обеспечения, реализующего внедрение цифровых водяных знаков в вычислительные и управляющие устройства, построенные на основе LUT-ориентированной элементной базы (например, FPGA или программируемых логических интегральных схем со схожими архитектурами).

Список литературы: 1. *Shih F.* Multimedia Security: Watermarking, Steganography, and Forensics / *F. Shih*. – CRC Press, 2013. – 424 p. 2. *Cox I.* Digital Watermarking and Steganography / *I. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich*. – Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 592 p. 3. *Skoudis E.* Malware: Fighting Malicious Code / *E. Skoudis, L. Zeltser*. – New Jersey: Prentice Hall, 2004. – 672 p. 4. *Hamilton A.* Survey of Static Software Watermarking / *A. Hamilton, S. Danicic* // Proceedings of Internet Security World Congress (WorldCIS-2011). – London, 2011. – P. 100-107. 5. *Hakun L.* New approaches for software watermarking by register allocation / *L. Hakun, K. Keiichi* // Proceedings of the ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel Distributed Computing. – 2008. – P. 63-68. 6. *Xiao Cheng L.* Software Watermarking Algorithm Based on Register Allocation / *L. Xiao Cheng, C. Zhiming* // Proceedings of International Symposium Distributed Computing and Applications to Business Engineering and Science (DCABES). – Hong Kong, 2010. – P. 539-543. 7. *Защелкин К.В.* Метод внедрения цифровых водяных знаков в аппаратные контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой / *К.В. Защелкин, Е.Н. Иванова* // Информатика и математические методы в моделировании. – Одесса, 2013. – Т. 3. – № 4. – С. 369-384. 8. *Защелкин К.В.* Метод стеганографического скрытия данных в LUT-ориентированных аппаратных контейнерах / *К.В. Защелкин, Е.Н. Иванова* // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ, 2013. – Вип. 12 (88). – С. 83-90. 9. *Защелкин К.В.* Развитие

метода стеганографического скрываетия данных в LUT-ориентированных аппаратных контейнерах / *К.В. Защелкин, Е.Н. Иванова* // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – Київ, 2014. – Вип. 13 (89). – С. 231-239. **10.** *Грушвицкий Р.И.* Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой / *Р.И. Грушвицкий, А.Х. Мурцаев, Е.П. Угрюмов*. – СПб.: БХВ, 2010. – 650 с. **11.** *Paul S.* Reconfigurable Computing Using Content Addressable Memory for Improved Performance and Resource Usage / *S. Paul, S. Bhunia* // *Proceedings of Design Automation Conference ACM/IEEE (DAC-2008)*. – Anaheim, 2008. – P. 786-791. **12.** *Fridrich J.* Steganography in Digital Media / *J. Fridrich*. – Cambridge University Press, 2010. – 438 p. **13.** *Беззатеев С.В.* Специальные классы кодов для стеганографических систем / *С.В. Беззатеев, Н.В. Волошина, К.А. Жиданов* // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2012. – № 1-2 (25). – С. 112-118. **14.** *Westfeld A.* F5 – A Steganographic Algorithm. High Capacity Despite Better Steganalysis / *A. Westfeld* // *Information Hiding. 4-th International Workshop*. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – Vol. 2137. – P. 289-302. **15.** *Drozdz A.V.* Use of Natural LUT Redundancy to Improve Trustworthiness of FPGA Design / *A.V. Drozdz, M.A. Drozdz, M.A. Kuznietsov* // *Proceedings of the 12th International Conference ICTERI-2016*. – Kiev, Ukraine, 2016. – P. 322-331. **16.** *Дрозд Ю.В.* Естественные ресурсы компьютерных систем на базе FPGA / *Ю.В. Дрозд, А.В. Дрозд, Н.А. Кузнецов* // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2013. – Вып. 2 (41). – С. 223-226. **17.** *Защелкин К.В.* Исследование основных характеристик FPGA-проектов при изменении кодов в блоках LUT // *К.В. Защелкин, Кузнецов Н.А., Дрозд А.В.* // *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія "Комп'ютерні системи та компоненти"*. – Чернівці, 2014. – Т. 5. – Вип. 2. – С. 41-45.

References:

1. Shih, F. (2013), *Multimedia Security: Watermarking, Steganography, and Forensics*, CRC Press, Boston, 424 p.
2. Cox, I., Miller, M., Bloom, J. and Fridrich, J. (2008), *Digital Watermarking and Steganography*, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington, 592 p.
3. Skoudis, E. and Zeltser, L. (2004), *Malware: Fighting Malicious Code*, Prentice Hall, New Jersey, 672 p.
4. Hamilton, A. and Danicic, S. (2011), "Survey of Static Software Watermarking", *Proceedings of Internet Security World Congress (WorldCIS-2011)*, 2011, London, pp. 100-107.
5. Hakun, L. and Keiichi, K. (2008) "New approaches for software watermarking by register allocation", *Proceedings of the ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel Distributed Computing*, 2008, Washington, DC, USA, pp. 63-68.
6. Xiao Cheng, L. and Zhiming, C. (2010), "Software Watermarking Algorithm Based on Register Allocation", *Proceedings of International Symposium Distributed Computing and Applications to Business Engineering and Science (DCABES)*, 2010, Hong Kong, pp. 539-543.
7. Zashchelkin, K.V. and Ivanova, E.N. (2013), "Method of embedding digital watermarks in hardware containers with LUT-oriented architecture", *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, Vol. 3, No 4, pp. 369-384.
8. Zashchelkin, K.V. and Ivanova, E.N. (2013), "Method of steganographical data hiding in LUT-oriented hardware containers", *Electrotechnic and Computer Systems*, Vol. 12 (88), pp. 83-90.

9. Zashchelkin, K.V. and Ivanova, E.N. (2014), "Method development for implementing the steganography data hiding in LUT-oriented hardware containers", *Electrotechnic and Computer Systems*, Vol. 13 (89), pp. 231-239.
10. Grushvitsky, R.I., Mursaev, A.H. and Ugrumov, E.P. (2010), *Designing systems on chips with programmable structure*, BHV, St. Petersburg, Russian Federation, 650 p.
11. Paul S. and Bhunia S. (2008), "Reconfigurable Computing Using Content Addressable Memory for Improved Performance and Resource Usage", *Proceedings of Design Automation Conference ACM/IEEE (DAC-2008)*, Anaheim, pp. 786-791.
12. Fridrich J. (2010), *Steganography in Digital Media*, Cambridge University Press, New York, 438 p.
13. Bezzateev, S.V., Voloshina, N.V. and Zhidanov, K.A. (2012), "Special class of error correcting codes for steganographic systems", *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*, No 1-2 (25), pp. 112-118.
14. Westfeld, A. (2001), "F5 – A Steganographic Algorithm. High Capacity Despite Better Steganalysis", *Information Hiding. 4-th International Workshop*, 2001, Berlin, Vol. 2137, pp. 289-302.
15. Drozd, A.V., Drozd, M.A. and Kuznetsov, M.A. (2016), "Use of Natural LUT Redundancy to Improve Trustworthiness of FPGA Design", *Proceedings of the 12th International Conference ICTERI-2016*, 2016, Kiev, Ukraine, pp. 322-331.
16. Drozd, J.V., Drozd, A.V. and Kuznetsov, N.A. (2013), "Natural resources of computer systems based on FPGA", *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, Vol. 2 (41), pp. 223-226.
17. Zashchelkin, K.V., Kuznetsov, N.A. and Drozd, A.V. (2014), "Research in key features of FPGA-projects in case of changing the codes in LUT-blocks", *Scientific Herald of Chernivtsy University, Series: Computer systems and components*, Vol. 5, No 2, pp. 41-45.

Статью представил д-р техн. наук, проф. Одеського національного політехнічного університету Ситников В.С.

Поступила (received) 25.08.2016

Zashcholkin Konstantin, PhD, Tech., Associate Professor
Odessa National Polytechnic University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel.: (048) 734-83-22, e-mail: const-z@te.net.ua
ORCID ID: 0000-0003-0427-9005

Ivanova Elena, Senior Lecturer
Odessa National Polytechnic University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel.: (048) 734-83-91, e-mail: enivanova@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-4743-6931

УДК 004.056.53

Адаптація метода вбудовування цифрових водяних знаків F5 до середовища LUT-орієнтованих інформаційних контейнерів / Защолкін К.В., Іванова О.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 135 – 146.

Розглянуто підходи до контролю інформаційних об'єктів за допомогою технології цифрових водяних знаків. Запропоновано метод вбудовування цифрового водяного знака в інформаційні контейнери з LUT-орієнтованою архітектурою. Метод базується на використанні композиції відомого методу F5, що застосовується для контролю мультимедійних інформаційних об'єктів, і підходів до вбудовування додаткової інформації в LUT-орієнтовані контейнери. Іл. 3. Бібліогр. 17 назв.

Ключові слова: контроль інформаційних об'єктів, цифрові водяні знаки, метод F5, LUT-орієнтовані контейнери.

УДК 004.056.53

Адаптация метода внедрения цифровых водяных знаков F5 к среде LUT-ориентированных информационных контейнеров / Защелкин К.В., Иванова Е.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 135 – 146.

Рассмотрены подходы к контролю информационных объектов при помощи технологии цифровых водяных знаков. Предложен метод внедрения цифрового водяного знака в информационные контейнеры с LUT-ориентированной архитектурой. Метод основан на использовании композиции известного метода F5, применяемого для контроля мультимедийных информационных объектов, и подходов к внедрению дополнительной информации в LUT-ориентированные контейнеры. Ил. 3. Библиогр. 17 назв.

Ключевые слова: контроль информационных объектов, цифровые водяные знаки, метод F5, LUT-ориентированные контейнеры.

UDC 004.056.53

Adaptation of the F5 method for embedding digital watermarks into the environment of LUT-oriented information containers // Zashcholkin K.V., Ivanova E.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Informatics and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216). – P. 135 – 146.

The approaches to the information objects control have been considered by means of digital watermarking technology. We propose the method for embedding the digital watermark into containers with LUT-oriented architecture. The method is based on composition of well-known F5 method, which is implemented to control multimedia information objects, and approaches to embedding additional information into LUT-oriented containers. Figs.: 3. Refs.: 17 titles.

Keywords: information objects control, digital watermarks, F5 method, LUT-oriented containers.

С.Г. СЕМЕНОВ, д-р техн. наук, с.н.с., НТУ "ХПІ", Харьков,
Д.А. ЛИСИЦА, асп., НТУ "ХПІ", Харьков,
А.В. МОВЧАН, асп., НТУ "ХПІ", Харьков

GERT-МОДЕЛЬ НАЧАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ КОДА КИБЕРАТАКИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА К РЕСУРСАМ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОДНОРАНГОВОЙ СЕТИ

Разработана математическая GERT-модель начальной генерации кода кибератаки несанкционированного доступа к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети, отличающаяся от известных учетом основных этапов генерации в процессе математической формализации GERT-сети. В ходе моделирования получено аналитическое выражение для расчета времени генерации кода кибератаки несанкционированного доступа. Сделаны выводы о дальнейших практических разработках, связанных с полученными в статье результатами. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: GERT-модель, компьютерная система, несанкционированный доступ, моделирование, генерация кода кибератаки.

Постановка проблемы. В соответствии с требованиями системного подхода к защите информации, совокупность взаимосвязанных элементов, функционирование которых направлено на обеспечение безопасности, образует систему защиты информации. Такими элементами являются математические, технические и программные решения, а также человеческие ресурсы.

Сложность самой системы защиты информации определяется не только многоаспектностью ее структурно-функционального построения, но и сложностью внешних факторов, разнообразностью действий злоумышленников и просто пользователей, влияющих на процесс ее функционирования.

В последнее время все больший интерес у злоумышленников вызывают электронные информационные ресурсы. Соответственно наблюдается расширение спектра поведенческих портретов злоумышленников в рамках различного рода кибератак.

Для реализации кибератаки несанкционированного доступа (НСД) злоумышленник моделирует данное событие безопасности, приводящее к ожидаемому результату. Проведенные исследования показали, что в настоящее время существует ряд математических моделей [1 – 7] в этой области. Однако, известные модели [2, 3] кибератак НСД не используют такой компонент, как "действия злоумышленника". Это приводит к тому, что эффективность систем защиты информации [5] от НСД

снижается, и они не всегда могут выявить такой род кибератак. Поэтому разработка математической модели кибератак НСД является актуальной научной задачей.

Анализ литературы [2, 6] показал, что в настоящее время кибератаку НСД можно разбить на несколько функциональных этапов:

- генерации кода кибератаки НСД;
- активного "снифинга";
- активного анализа системы управления ресурсом;
- внедрения в компьютерную систему.

Проведенные исследования показали, что общий алгоритм кибератаки НСД имеет ряд специфических итераций, в значительной степени усложняющих общий процесс его математической формализации. Поэтому представляется целесообразным разбиение этого процесса на ряд подпроцессов. При этом для математического моделирования НСД наиболее гибкими и полезными представляются сетевые стохастические модели. Частным случаем стохастической модели является GERT-сеть (GERT: *Graphical Evaluation and Review Technique* – метод графического отображения).

Во многом это связано с доступностью математического аппарата нахождения непрерывной плотности распределения вероятностей времени прохождения GERT-сети при условии, что множество распределений, которыми могут характеризоваться отдельные дуги модели, включает в себя известные распределения: дискретное, биномиальное, пуассоновское, геометрическое, отрицательное биномиальное, равномерное, экспоненциальное, гамма и нормальное.

Кроме этого, существует возможность нахождения и использования непрерывных распределений произвольного вида. Предлагаемые методы основаны на переходе от эквивалентной передаточной функции $W_E(s)$ GERT-сети к ее характеристической функции $X_E(\zeta)$ и использовании формулы обращения [8].

Из [8] известно, что плотность распределения вероятностей времени прохождения GERT-сети определяется следующим выражением:

$$\varphi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\zeta x} X_E(\zeta) d\zeta. \quad (1)$$

Характеристическая функция $X_E(\zeta)$ находится на основе топологического уравнения Мейсона [9] путем замены в эквивалентной производящей функции моментов $M_E(s)$ переменной s на $i\zeta$, где ζ – действительная переменная. Если $X(\zeta)$, $M(\zeta)$ соответственно –

характеристическая функция и производящая функция моментов GERT-сети, то справедливо соотношение: $M(i\zeta) = X(\zeta)$.

Для обеспечения условий интегрирования введем в подынтегральное выражение множитель $\exp(-0,5\zeta^2)$ [8]. Это равносильно добавлению в GERT-сеть последовательной ветви, описываемой нормально распределенной случайной величиной ζ_2 с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной единице. Фиктивную ветвь можно включить сразу после источника s сети. Если случайная величина ζ_1 есть время прохождения GERT-сети, то плотность распределения суммы $\zeta_1 + \zeta_2$ определяется выражением

$$\tilde{\varphi}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\zeta x} \bar{X}_E(\zeta) d\zeta,$$

где $\bar{X}_E(\zeta) = X_E(\zeta) \exp(-0,5\zeta^2)$.

После нахождения плотности $\tilde{\varphi}(x)$ должна быть найдена искомая плотность распределения $\varphi(x)$. Это достигается использованием численного метода трансформации закона распределения на основе решения системы линейных уравнений [10, 11].

Из топологического уравнения следует:

$$W_E(v, t) = \frac{\sum_{\gamma_1=1}^{\Gamma_1} \prod_{\delta_1=1}^{\Delta_1} \tilde{W}_{\gamma_1 \delta_1}^1 + \dots - (-1)^m \sum_{\gamma_m=1}^{\Gamma_m} \prod_{\delta_m=1}^{\Delta_m} \tilde{W}_{\gamma_m \delta_m}^m}{1 - \sum_{a_1=1}^{A_1} \prod_{\beta_1=1}^{B_1} \bar{W}_{a_1 \beta_1}^1 + \dots + (-1)^l \sum_{a_l=1}^{A_l} \prod_{\beta_l=1}^{B_l} \bar{W}_{a_l \beta_l}^1}, \quad (2)$$

где Γ_i – количество сетей i -го порядка от истока v к стоку t сети; Δ_i – число дуг i -го порядка на пути от истока v к стоку t ; A_i – количество сетей i -го порядка приводящих к истоку v в обратном направлении; B_i – число дуг i -го порядка на пути, приводящего к истоку v ;

$\prod_{\delta_1=1}^{\Delta_1} \tilde{W}_{\gamma_1 \delta_1}^1$ – произведение W -функций дуг r_i -ой петли i -го порядка,

включающей в себя сток t , $1 \leq i \leq m$;

$\prod_{\beta_j=1}^{B_j} \bar{W}_{a_j \beta_j}^j$ – произведение W -функций дуг a_j -ой петли j -го

порядка, не включающей в себя сток t , $1 \leq j \leq l$.

Переходя к характеристическим функциям, получаем

$$X_E(\zeta) = \frac{\frac{1}{P_E} \left(\sum_{\gamma_i=1}^{\Gamma_i} \prod_{\delta_i=1}^{\Delta_i} \check{p}_{\gamma_i \delta_i} \check{X}_{\gamma_i \delta_i}^i + \dots + (-1)^m \sum_{\gamma_m=1}^{\Gamma_m} \prod_{\delta_m=1}^{\Delta_m} \check{p}_{\gamma_m \delta_m} \check{X}_{\gamma_m \delta_m}^m \right)}{1 - \sum_{a_i=1}^{A_i} \prod_{\beta_i=1}^{B_i} \bar{p}_{\gamma_i \delta_i} \bar{X}_{a_i \beta_i}^i + \dots + (-1)^l \sum_{a_i=1}^{A_i} \prod_{\beta_i=1}^{B_i} \bar{p}_{\gamma_m \delta_m} \bar{X}_{a_i \beta_i}^i}. \quad (3)$$

Здесь $\prod_{\delta_i=1}^{\Delta_i} \check{p}_{\gamma_i \delta_i} \check{X}(\zeta)_{\gamma_i \delta_i}^i$ и $\prod_{\beta_j=1}^{B_j} \bar{p}_{\gamma_j \delta_j} \bar{X}(\zeta)_{\gamma_j \delta_j}^j$ находятся из

произведений

$$\prod_{\delta_i=1}^{\Delta_i} \check{W}(s)_{\gamma_i \delta_i}^i = \prod_{\delta_i=1}^{\Delta_i} \check{p}_{\gamma_i \delta_i} \check{M}(s)_{\gamma_i \delta_i}^i, \quad \bar{W}(s)_{a_j \beta_j}^j = \prod_{\beta_j=1}^{B_j} \bar{p}_{\gamma_j \delta_j} \bar{M}(s)_{\gamma_j \delta_j}^j$$

заменой $s \rightarrow i\zeta$.

В ряде практически важных случаев распределения необходимо получать в виде математических выражений. К таким задачам можно отнести и задачу исследования алгоритмов кибератаки НСД. При этом решение задачи нахождения плотности распределения времени прохождения сформированной на основе разработанных алгоритмов GERT-сети необходимо начать с допущения, что непрерывной плотности распределения вероятностей времени прохождения GERT-сети $\phi(x)$ определяется выражением (1).

Из литературы [8] известно, что в уравнении (1) можно выполнить замену переменных: $z = -i\zeta$. Функцию, получающуюся в результате замены переменных, обозначим через $\Phi_E(z)$. Функция $\Phi_E(z)$ может быть представлена через комбинации функций $\Phi(z)$ петель первого и более высоких порядков в зависимости от того, принадлежит ли данной петле или нет источник и сток GERT-сети:

$$\Phi_E(z) = \frac{\sum_{\gamma_i=1}^{\Gamma_i} \prod_{\delta_i=1}^{\Delta_i} \check{\Phi}_{\gamma_i \delta_i}^i(z) + \dots + (-1)^{m+1} \sum_{\gamma_m=1}^{\Gamma_m} \prod_{\delta_m=1}^{\Delta_m} \check{\Phi}_{\gamma_m \delta_m}^m(z)}{1 - \sum_{a_i=1}^{A_i} \prod_{\beta_i=1}^{B_i} \bar{\Phi}_{\gamma_i \delta_i}^i(z) + \dots + (-1)^l \sum_{a_i=1}^{A_i} \prod_{\beta_i=1}^{B_i} \bar{\Phi}_{\gamma_i \delta_i}^l(z)}, \quad (4)$$

где $\prod_{\delta_i=1}^{\Delta_i} \check{\Phi}_{\gamma_i \delta_i}^i(z)$ – произведение $\Phi(z)$ -функций ветвей петли i -го

порядка, включающей в себя сток t , $1 \leq i \leq m$, $\gamma_1 \leq \gamma_i \leq \gamma_m$;

$\prod_{\delta_j=1}^{B_j} \overline{\Phi}_{a_j \beta_j}^j$ – произведение $\Phi(z)$ -функций ветвей петли j -го

порядка, не включающей в себя сток t , $1 \leq j \leq l$,

$a_1 \leq a_j \leq a_l$; $\Gamma_1, \dots, \Gamma_m$ – число петель порядков $1, \dots, m$, включающих в себя сток сети; A_1, \dots, A_l – число петель порядков $1, \dots, l$, не включающих в себя сток сети.

Если функция $\Phi_E(z)$ в полуплоскости $\text{Re } z < 0$ удовлетворяет условиям леммы Жордана, то интеграл, взятый вдоль контура Бромвича, равен сумме вычетов функции $\Phi_E(z)$ относительно всех ее особенностей [12, 13]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zx} \Phi_E(z) dz = \sum_{k=1}^n \text{Res}_{z=z_k} [e^{zx} \Phi_E(z)].$$

Для выполнения условия леммы Жордана необходимо, чтобы в левой полуплоскости функция $\Phi_E(z)$ была аналитической за исключением конечного числа полюсов, и равномерно относительно $\arg z$ стремилась к нулю при $|z| \rightarrow \infty$.

Функция $\Phi_i(z) = \lambda / (\lambda + z)$ экспоненциального распределения равномерно сходится к нулю относительно $\arg z$ при $|z| \rightarrow \infty$. Имеется простой полюс в точке $z = -\lambda$. Функция $\Phi_i(z) = \lambda^a / (\lambda + z)^a$ распределения Эрланга равномерно сходится к нулю относительно $\arg z$ при $|z| \rightarrow \infty$. Имеется полюс кратности a в точке $z = -\lambda$.

При преобразовании структуры GERT-сети к ациклическому виду последняя представляется в виде эквивалентной совокупности последовательных и параллельных ветвей. Если ациклическая GERT-сеть имеет M параллельных ветвей с вероятностями выбора q_1 , и каждая из них состоит из N последовательных ветвей с вероятностями выбора p_{ij} , то при использовании в качестве характеристик ветвей

распределений Эрланга имеем $\Phi_E(z) = \sum_{i=1}^M q_i \prod_{j=1}^{N_i} p_{ij} \left[\lambda_{ij}^{k_{ij}} / (\lambda_{ij} + z)^{k_{ij}} \right]$.

Функция $\Phi_E(z)$ является аналитической и все ее особые точки лежат в левой полуплоскости. Таким образом, задача нахождения плотности распределения времени прохождения такой GERT-сети может быть решена путем нахождения предела последовательности распределений.

Целью данной статьи является разработка GERT-модели начальной генерации кода кибератаки несанкционированного доступа к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети.

Основная часть. При моделировании кибератаки НСД возникает большое число задач, которые могут быть решены с использованием моделей такого рода. Они могут использоваться как независимо друг от друга, так и в комбинированных системах. В распоряжение пользователя могут быть предоставлены несколько новых разновидностей моделей GERT (однородные сети большой размерности, неоднородные сети, сети со старением заявок, случайные GERT-сети и т.д.).

Проведен анализ и разработана GERT-модель начального этапа рассматриваемого злоумышленного воздействия – начальной генерации кода кибератаки НСД к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети.

1. Разработка GERT-сети этапа начальной генерации кода.

Структурная схема алгоритма этого этапа представлена на рис. 1. Структурная схема показывает пошаговый алгоритм действий, которые должен выполнить злоумышленник для НСД к ресурсам компьютерной системы.

Данный алгоритм можно представить в виде стохастической GERT-сети (рис. 2), в которой переход системы из состояния в состояние связывается с выполнением операции алгоритма (рис. 1), описываемой случайной величиной с известным законом распределения.

На рис. 2 и табл. 1 переход (1, 2) характеризует операции выбора оборудования – жертвы для взлома, при этом заранее известно, что атака производится в пределах одноранговой сети (P_1 – вероятность перехода из 1 в 2, λ_1 – соответствующая интенсивность перехода).

Переходы (2, 3) (2, 4) описывают процесс выбора метода атаки с учетом определения операционной системы на узле – жертве, *Windows* или *Linux* соответственно (P_2 – вероятность перехода из 2 в 3, λ_2 – соответствующая интенсивность; $1 - P_2 - P_3$ – вероятность перехода из 2 в 4, λ_4 – соответствующая интенсивность перехода).

Переходы (2, 1) и (3, 1) представляют ситуации, когда злоумышленник в силу ряда причин не смог осуществить выбор метода атаки в пределах заданного времени или характеристики найденного злоумышленного программного обеспечения (ПО) не соответствуют условиям и целям кибератаки НСД. Так как данная ситуация может рассматриваться как идентичная для состояний 2 и 3, то вероятности перехода из 2 в 1 и из 3 в 1 одинаковы и равны P_3 при соответствующей интенсивности перехода λ_3 .

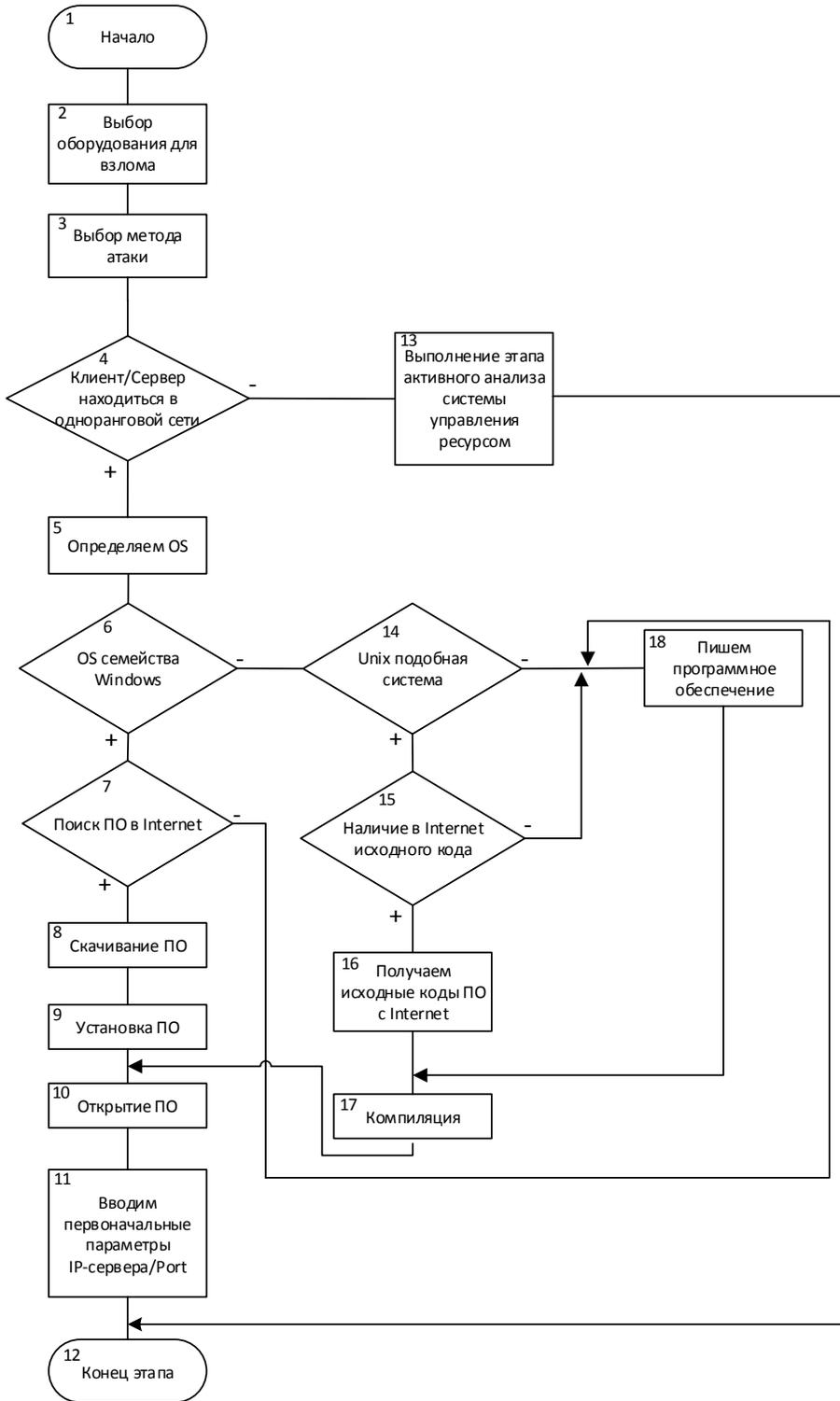


Рис. 1. Структурная схема алгоритма этапа генерации кода кибератаки НСД

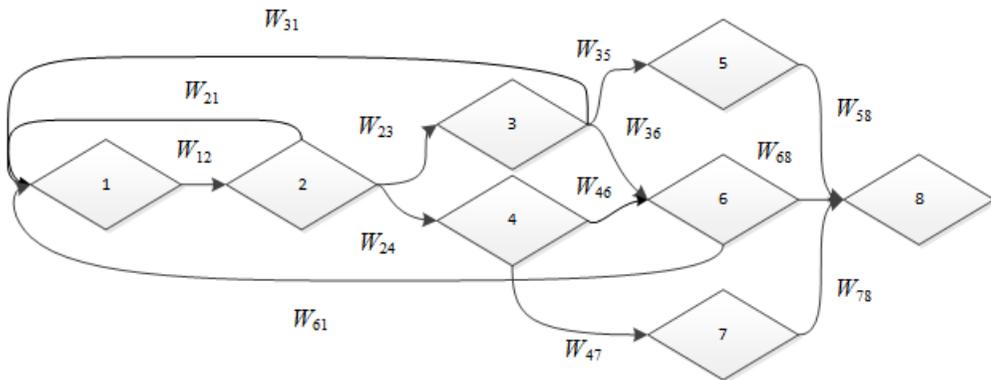


Рис. 2. GERT-сеть алгоритма генерации кода кибератаки НСД

Переход (3, 5) характеризует процесс поиска программного обеспечения (ПО) в глобальной сети Интернет, скачивания и установки функционирующего под *OS Windows* (P_4 – вероятность перехода из 3 в 5, λ_2 – соответствующая интенсивность).

Соответственно переход (4, 7) описывает процесс получения исходного кода в глобальной сети Интернет и компиляции ПО под *OS Linux* ($1 - P_5$ – вероятность перехода из 4 в 7, λ_2 – соответствующая интенсивность перехода).

Переходы (3, 6) и (4, 6) представляют процедуры кодирования и отладки ПО под *OS Windows* и *Linux* соответственно, в случае отсутствия такового в глобальной сети Интернет ($1 - P_3 - P_4$ – вероятность перехода из 3 в 6, λ_4 – соответствующая интенсивность; P_5 – вероятность перехода из 4 в 6, λ_4 – соответствующая интенсивность перехода).

Переход (6, 1) характеризует ситуацию, когда злоумышленник не смог выполнить операции кодирования и отладки злоумышленного ПО в заданное для атаки время ($1 - P_6$ – вероятность перехода из 6 в 1, λ_6 – соответствующая интенсивность перехода).

Переходы (5, 8), (6, 8) и (7, 8) описывают процедуры открытия злоумышленного ПО и ввода первоначальных параметров IP-сервера узла-жертвы (P_4 – вероятность перехода из 5 в 8, λ_2 – соответствующая интенсивность; P_6 – вероятность перехода из 6 в 8, λ_5 – соответствующая интенсивность; $1 - P_5$ – вероятность перехода из 7 в 8, λ_2 – соответствующая интенсивность перехода).

Анализ работ [2, 3, 6], а также проведенные исследования процедур компиляции, отладки, скачивания, установки и др., входящих в процесс первоначальной генерации кода кибератаки НСД, позволили сформировать характеристики рассмотренных в GERT-модели ветвей и параметров распределения и представить их в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики ветвей модели

№ п/п	Ветвь	W -функция	Вероятность перехода	Производящая функция моментов
1.	(1, 2)	W_{12}	P_1	$\lambda_1 / (\lambda_1 - s)$
2.	(2, 3)	W_{23}	P_2	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
3.	(2, 1)	W_{21}	P_3	$\lambda_3 / (\lambda_3 - s)$
4.	(2, 4)	W_{24}	$1 - P_2 - P_3$	$\lambda_4 / (\lambda_4 - s)$
5.	(3, 5)	W_{35}	P_4	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
6.	(3, 1)	W_{31}	P_3	$\lambda_3 / (\lambda_3 - s)$
7.	(3, 6)	W_{36}	$1 - P_3 - P_4$	$\lambda_4 / (\lambda_4 - s)$
8.	(4, 6)	W_{46}	P_5	$\lambda_4 / (\lambda_4 - s)$
9.	(4, 7)	W_{47}	$1 - P_5$	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
10.	(5, 8)	W_{58}	P_4	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$
11.	(6, 8)	W_{68}	P_6	$\lambda_5 / (\lambda_5 - s)$
12.	(6, 1)	W_{61}	$1 - P_6$	$\lambda_6 / (\lambda_6 - s)$
13.	(7, 8)	W_{78}	$1 - P_5$	$\lambda_2 / (\lambda_2 - s)$

В соответствии с характеристиками ветвей GERT-сети эквивалентную передаточную W -функцию времени начальной генерации кода кибератаки НСД к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети можно представить, как [10, 11]:

$$W_E(s) = \frac{(W_{12}W_{23}W_{35}W_{58} + W_{12}W_{23}W_{36}W_{68} + W_{12}W_{24}W_{46}W_{68} + W_{12}W_{24}W_{47}W_{78})}{1 - W_{12}W_{21} - W_{12}W_{23}W_{31} - W_{12}W_{23}W_{36}W_{61} - W_{12}W_{24}W_{46}W_{61}}$$

Учитывая составляющие GERT-сеть алгоритма генерации кода кибератаки НСД и используя соответствующие данные табл. 1 получим основную формулу для расчета W -функции времени начальной генерации кода кибератаки НСД к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети [10, 11]:

$$W_E(s) = \frac{\left(p_1(\lambda_1/\lambda_1 - s) \left(\begin{aligned} & p_2 p_4^2 \lambda_2^3 (\lambda_1 - s)(\lambda_4 - s)^2 (\lambda_5 - s) + \\ & + p_1 p_2 p_6 q_2 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_5 (\lambda_2 - s)^2 (\lambda_4 - s) + \\ & + p_1 p_5 p_6 q_1 \lambda_1 \lambda_4^2 \lambda_5 (\lambda_2 - s)^3 + \\ & + p_1 q_1 q_3^2 \lambda_1 \lambda_2^2 \lambda_4 (\lambda_2 - s)(\lambda_5 - s) \end{aligned} \right) \right)}{\left(\begin{aligned} & (\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\lambda_3 - s)(\lambda_4 - s)^2 (\lambda_6 - s) - \\ & - p_1 p_2 \lambda_1 \lambda_3 (\lambda_2 - s)(\lambda_4 - s)^2 (\lambda_6 - s) - \\ & - p_1 p_2 p_3 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 (\lambda_4 - s)^2 (\lambda_6 - s) - \\ & - p_1 p_2 q_1 q_2 p_3 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_6 (\lambda_4 - s)(\lambda_3 - s) - \\ & - p_1 p_5 q_1 q_4 p_3 \lambda_1 \lambda_4^2 \lambda_6 (\lambda_2 - s)(\lambda_3 - s) \end{aligned} \right)}, \quad (5)$$

где $q_1 = 1 - p_2 - p_3$; $q_2 = 1 - p_3 - p_4$; $q_3 = 1 - p_5$; $q_4 = 1 - p_6$.

Проведенные исследования показали, что в сложных GERT-сетях с возможными циклами отсутствуют простые методы нахождения особых точек функции $\Phi_E(z)$ (выражение (4)) путем замены действительных переменных ($z = -i\zeta$), где ζ – действительная переменная [10 – 12]. Связано это с тем, что для нахождения особых точек необходимо решать нелинейные уравнения, и чем сложнее структура GERT-сети, тем сложнее и исходное уравнение [2, 7, 8]. Поэтому в ходе моделирования, выполняя комплексное преобразование [10 – 12] и используя выражения (4) и (5), получим:

$$\Phi_E(z) = \frac{-yz^6 + bz^5 - tz^4 + uz^3 - kz^2 + wz - h}{(-z^6 + jz^5 - dz^4 + gz^3 - vz^2 + rz - c)(\lambda_1 + z)(\lambda_2 + z)(\lambda_5 + z)}, \quad (6)$$

где $y = p_1 p_2 p_4 \lambda_1 \lambda_2^3$;

$$b = -p_1 \lambda_1 \left(\begin{aligned} & (p_2 (p_4 \lambda_2^3 (1 + \lambda_1 + \lambda_5 + 2\lambda_4) + p_1 p_6 q_2 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_5)) + \\ & + p_1 p_5 p_6 q_1 \lambda_1 \lambda_4^2 \lambda_5 \end{aligned} \right);$$

$$t = p_1 \lambda_1 \left(p_2 \left(p_4 \lambda_2^3 + p_4 \lambda_2^3 (\lambda_1 + \lambda_5 + 2\lambda_4)(\lambda_6 + \lambda_3) + p_1 p_6 q_2 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_5 + p_4 \lambda_2^3 (\lambda_1 \lambda_5 + 2\lambda_4 \lambda_5 + 2\lambda_1 \lambda_4 + \lambda_4^2 + p_1 p_6 q_2 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 \lambda_5 (\lambda_4 + 2\lambda_2)) \right) + 3 p_1 p_5 p_6 q_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4^2 \lambda_5 \right) + \dots$$

$$c = \left(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4^2 \lambda_6 + p_1 p_3 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4^2 \lambda_6 + p_1 p_2 p_3 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4^3 \lambda_6 + p_1 p_2 q_1 q_2 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4^2 \lambda_6 + p_1 p_5 q_1 q_4 \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3 \lambda_4^2 \lambda_6 \right).$$

Тогда плотность распределения вероятностей времени генерации кода кибератаки НСД:

$$\varphi(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zx} \frac{-yz^6 + bz^5 - tz^4 + uz^3 - kz^2 + wz - h}{\left((-z^6 + jz^5 - dz^4 + gz^3 - vz^2 + rz - c) \times (\lambda_1 + z)(\lambda_2 + z)(\lambda_5 + z) \right)}, \quad (7)$$

где интегрирование выполняется по контуру Бромвича [7].

Функция $\Phi(z)$ кроме простых полюсов, определяемых корнями уравнения $-z^6 + jz^5 - dz^4 + gz^3 - vz^2 + rz - c = 0$, может иметь и полюсы второго – четвертого порядка. Это возможно в тех случаях, когда значения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_5$ или совпадают между собой, или равны значениям корней z_3, z_4, z_5, z_6 . В этих случаях плотность распределения времени тестирования программного обеспечения $\varphi(x)$ находится по формуле нахождения вычетов γ_{-1} от полюсов z_n порядка m

$$\gamma_{-1} = \frac{1}{(m-1)!} \lim_{z \rightarrow z_n} \frac{d^{m-1} [(z - z_n)^m e^{zx} \Phi(z)]}{dz^{m-1}}.$$

Выражение (6), в соответствии с работами [1, 7, 8], можно представить как дробнорациональную функцию относительно z со степенью знаменателя большей, чем степень числителя, поэтому для него выполняются условия леммы Жордана. Функция $\Phi(z)$ имеет полюсы в точках $z_1 = -\lambda_1, z_2 = -\lambda_2, z_3 = -\lambda_5$. Многочлен

$-z^6 + jz^5 - dz^4 + gz^3 - vz^2 + rz - c$ порождает еще шесть полюсов. Решение уравнения

$$-z^6 + jz^5 - dz^4 + gz^3 - vz^2 + rz - c = 0 \quad (8)$$

может быть найдено любым численным методом. Тогда получим еще шесть особых точек z_4, z_5, z_6, z_7, z_8 .

Выводы. Таким образом, предложена математическая GERT-модель процесса генерации кода кибератаки НСД. Предложенная математическая модель отличается от известных учетом основных этапов генерации в процессе математической формализации GERT-сети. Модель может быть использована для исследования основных этапов генерации кода кибератаки НСД с целью выработки практических рекомендаций противодействия процессу НСД к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети, а также при разработке новых методов, алгоритмов и способов управления компьютерными системами.

Применение GERT-сетей в ходе математического моделирования даст возможность использовать результаты, полученные в аналитическом виде (функции, плотности распределения) для проведения сравнительного анализа и исследований, более сложных комплексных этапов кибератаки НСД.

Список литературы: 1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – С. 479. 2. Семенов С.Г. Методика математического моделирования защищенной ИТС на основе многослойной GERT-сети / С.Г. Семенов // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков, 2012. – Вып. 62 (968). – С. 173–181. 3. Семенов С.Г. Моделирование защищенного канала связи с использованием экспоненциальной GERT-сети / С.Г. Семенов, А.А. Можжаев // Информатика, математическое моделирование, экономика: Сборник научных статей. – Смоленск.: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ "Российский университет кооперации". – 2012. – Том. 1. – С. 152-160. 4. Тихомиров В.М. Десять доказательств основной теоремы алгебры / В.М. Тихомиров, В.В. Успенский // Математическое просвещение. – МЦНМО, 1997. – № 1. – С. 50-70. 5. Шорошев В. Перспективный метод защиты информационных ресурсов сетей Интранет / В. Шорошев // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – К.: НТУ "КПІ". – 2003. – Вип. 7. – С. 62–76. 6. Semenov S.G. Protection Data in computerized Governors systems / S.G. Semenov, V.V. Davydov, C.Yu. Gavrylenko // LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. – Germany, 2014. – 236 p. 7. Cohen F. Computational aspects of computer viruses Computers & Security / F. Cohen. – 1989. – Vol. 8. – P. 325-344. 8. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер. – М.: Мир. – 1984. – 738 с. 9. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир. – 1984. – 496 с. 10. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Наука. – 1987. – 627 с. 11. Крайников А.В. Вероятностные методы в вычислительной технике / А.В. Крайников, Б.А. Курдииков,

А.Н. Лебедев и др. – М.: Высш. шк. – 1986. – 312 с. **12.** Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука. – 1987. – С. 688. **13.** Привалов И.И. Введение в теорию функций комплексного переменного / И.И. Привалов. – М.: Наука. – 1984. – 432 с.

References:

1. Gmurman, V.E. (2003), *Probability theory and mathematical statistics*, Moscow Higher School, 479 p.
2. Semenov, S.G. (2012), "Methods of mathematical modeling based on ITS protected multilayer GERT-networks", *Journal of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of scientific papers. Special Issue: Information and Modeling*, 173-181 p.
3. Semenov, S.G. and Mozhaev, A.A. (2012), "Simulation of a secure communication channel with exponential GERT-network", *Information technology, mathematical modeling, economics: Collected articles*. – Smolensk Smolensk branch.: ANO VPO RF CC "Russian University of Cooperation", Vol. 1, pp. 152-160
4. Tikhomirov, V.M. (1997), "Ten proof of the fundamental theorem of algebra", *Mathematical education*, MTsNMO, No 1, 50-70 p.
5. Shoroshim, V. (2003), "Promising methods of protection of information resources networking", *Intranet, legal, regulatory she metrological support of the Defense Information Systems in Ukraine*, Kiev NTU "KPI", No 7, 62-76 pp.
6. Semenov, S.G., Davydov, V.V. and Gavrylenko, C.Yu. (2014), *Protection Data in computerized Governors systems*. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany, 236 p.
7. Cohen, F. (1989), "Computational aspects of computer viruses", *Computers & Security*, Vol. 8, No 4, 325 – 344 pp.
8. Feller, W. (1984), *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, Moscow, Mir, 738 p.
9. Phillips, D., Garcia-Diaz, A. (1984), *Network analysis methods*, Moscow, Mir, 496 p.
10. Bahvalov, N.S., Zhidkov, N.P. and Kobelkov, G.M. (1987), *Numerical methods*, Moscow, Nauka, 627 p.
11. Krainik, A.V., Kurdikov, B.A. and Lebedev, A. (1986), *Probabilistic Methods in Computer Science*, Moscow, Higher School, 312 p.
12. Lavrent'ev, M.A. and Shabat, B.V. (1987), *Methods of theory of functions of complex variables*, Moscow, Nauka, 688 p.
13. Privalov, I.I. (1984), *Introduction to the theory of functions of a complex variable*, Moscow, Nauka, 432 p.

Статью представил д-р техн. наук, профессор НТУ "ХПИ" Можяев А.А.

Поступила (received) 05.06.2016

Semenov Sergey, Dr.Sci.Tech, Senior Researcher
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (050) 300-76-47, e-mail: s_semenov@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-4472-9234

Lysytsia Dmytro, postgraduate
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (066) 584-20-09, e-mail: L.Dimon.O@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-1778-4676

Movchan Aleksandr, postgraduate
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (066) 584-20-09, e-mail: L.Dimon.O@mail.ru

УДК 004.422

GERT-модель початкової генерації коду кібератаки несанкціонованого доступу до ресурсів комп'ютерної системи однорангової мережі / Семенов С.Г., Лисиця Д.О., Мовчан А.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 147 – 161.

Розроблено математичну GERT-модель початкової генерації коду кібератаки несанкціонованого доступу до ресурсів комп'ютерної системи однорангової мережі, що відрізняється від відомих урахуванням основних етапів генерації в процесі математичної формалізації GERT-мережі. В ході моделювання отримано аналітичний вираз для розрахунку часу генерації коду кібератаки несанкціонованого доступу. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: GERT-модель, комп'ютерна система, несанкціонований доступ, моделювання, генерація коду кібератаки.

УДК 004.422

GERT-модель начальной генерации кода кибератаки несанкционированного доступа к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети / Семенов С.Г., Лисица Д.А., Мовчан А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 147 – 161.

Разработана математическая GERT-модель начальной генерации кода кибератаки несанкционированного доступа к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети, отличающаяся от известных учетом основных этапов генерации в процессе математической формализации GERT-сети. В ходе моделирования получено аналитическое выражение для расчета времени генерации кода кибератаки несанкционированного доступа. Сделаны выводы о дальнейших практических разработках, связанных с полученными в статье результатами. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: GERT-модель, компьютерная система, несанкционированный доступ, моделирование, генерация кода кибератаки.

UDC 004.422

GERT-model of the initial code generation cyber-attack unauthorized access to computer system resources Peer Network / Semenov S.G., Lysytsia D.O., Movchan A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216) – P. 147 – 161

A mathematical model of the initial GERT-model generation cyber-attack unauthorized access to a computer system-peer network resources, characterized by the famous view of the main stages in the process of generating a mathematical formalization of GERT-network. During the simulation, an analytical expression for the calculation of the time code generation cyber-attacks unauthorized access. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 13 titles.

Keywords: GERT-model, computer system, unauthorized access, simulation, code generation cyber-attacks.

V.I. TIKHONOV, dr. of techn. sciences, professor "ONAT", Odessa

PIECEWISE LINEAR PHASE MODULATION FOR TERNARY DATA CODING IN COHERENT WIRELESS CHANNEL

The paper introduces the novel method of combined time-frequency successive symbol coding in a packet based radio channel, which is performed due to continuous phase modulation by piecewise linear functions. The first layer of multilayered symbol presentation with ternary digits described. This method improves dynamic performance adaptation of the channel and extends its scalability. Figs.: 1. Refs.: 15 titles.

Keywords: symbol coding, phase modulation, multilayered symbol presentation, dynamic performance adaptation.

The problem statement. The evolution of wireless networks started from analogue NMT-450 (1981) and goes on to advanced 4G-decisions. However, the "4g" term is not explicitly determined yet [1]. There are at least three "4g" term used: the ITU approved 4G standard [2], the 4G commercial brand (so called circuit switch fall back [3]), and pure packet switched one-radio access based on voice over LTE technology (VoLTE). Some experts consider LTE promising physical layer platform for future wireless networks [4]. Compare to 1G – 3G mobile systems, the LTE implements a set of core novel ideas: a) coherent radio-communication channel with I/Q-modulation in contrast to legacy amplitude manipulation; b) combined time/frequency resource scheduling of radio channel access based on the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) within sampling intervals [5]; c) combined circuit/packet switching technique on the data link layer of radio access implemented due to the regular LTE-frames circulating with 100Hz-frequency between the evolved base station node (eNB) and associated user equipment entities (UEs) of mobile network cell; d) all over IP service provision, including voice communication and signaling, according to IMS concept (3GPP, 2008 [6]). The OFDM method is a core feature of LTE specification; it enhances the ether bandwidth utilization and its spectral efficiency, unlike legacy code division multiple access (CDMA) in 3G network. Though, the OFDM multiplexing faces known issues: high peak-to-average factor; extra guard interval owing to discontinuity of modulation function; limited number of modulation options. With respect to said above, we believe that data coding enhancement is an actual problem in coherent wireless communications.

Related works. A coherent electromagnetic bearer offers ample opportunities to increase spectral efficiency γ of physical channel. The legacy non-coherent DWDM channel with $\Delta F = 100GHz$ bandwidth and data

transmission rate $R \approx 10Gbps$ shows $\gamma \approx 0.1 b/s/Hz$. In turn, modern coherent optical systems demonstrate $\gamma \approx 3 b/s/Hz$ and more [7]. There are two coding methods primarily used in coherent systems: a) Nyquist pulse shaping in time domain; b) Fourier transforms in frequency domain [8]. These two methods are theoretically equivalent due to known relationships between the impulse response function $\eta(t)$ of a linear dynamic system and its Fourier image $g(\omega)$: $\eta(t) \leftrightarrow g(\omega)$, [9]. In practice, two aforesaid alternatives may counteract for some reasons. The Nyquist shaping requires instant measuring the signal in precise moments, while Fourier equalizer obtains integral characteristics of baseband signal. So, the first approach seems more adequate for stable optic channels, whereas Fourier method is more relevant to radio trunks with chaotic noise impact.

An actual issue remains the channel capacity C estimation [10]. Along with known Shannon-Hartley formula for analogue channel with spread signal spectrum it is estimated due to signal-to-noise ratio (SNR):

$$C = \Delta F \bullet \log_2(1 + SNR) \times bps. \quad (1)$$

According to (1), the maximal spectral efficiency depends on SNR:

$$\gamma \rightarrow \frac{C}{\Delta F} = \log_2(1 + SNR). \quad (2)$$

The SNR matter is commonly discussed in the context of additive Gaussian noise and non-coherent detection; however, this fundamental result apparently needs rethinking with respect to coherent detection technique. An original method to estimate the capacity limit of fiber-optic communication systems introduced in [11], where physical phenomena and sources of noise reviewed for data transmission over optical fiber, along with the impact of fiber quadratic electro-optic effect (Kerr nonlinearity). The capacity limit estimation proceeds on the basis of ring constellation diagram. Several impairment mitigation techniques introduced to define a fiber channel for the most relevant applications.

The ref [12] presents a sinc-pulse generation method based on direct synthesis a flat comb of phase-locked frequency with out-of-band suppression.

Known $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ function is a product of Dirac delta pulse shaping due to the boxcar spectral filter (so called "sinc-shaped pulse", or "Nyquist pulse"). This waveform is theoretically ideal filter for fast data coding, but not implemented precisely. Thus, a raised cosine filters envisaged to compromise sinc-shaping approach. Along with the time–frequency duality concept, the

normalized sinc-function $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x}$ maps on Fourier image of normalized boxcar form, i.e. rectangular function:

$$\text{rect}(z) = \Pi(z) = \begin{cases} 0, & \text{if } |z| > 0.5, \\ 0.5, & \text{if } |z| = 0.5, \\ 1, & \text{if } |z| < 0.5. \end{cases} \quad (3)$$

Therefore, the frequency comb corresponds to periodic sinc-pulses, and instead of shaping a single-sinc pulse, a sequence of sinc-pulses can be directly generated by optical frequency comb. It is also concluded in [12] that versus OFDM, Nyquist pulse shaping is less complex and sensitive to fiber nonlinearities, requires lower bandwidth and moderates peak-to-average ratio. However, the fast sinc-shaping with high order modulation is challenging. Recently, the first experimental high speed all optical sinc-pulse generation with time-division multiplexing reported in [13]. Also presented a super-Nyquist signal generation with optic/electrical spectrum shaping (referred to as Fast-than-Nyquist or FTN) [14]. The FTN signal estimated on maximum likelihood sequence (i.e. maximum a posteriori) where high tolerance shown in 9QAM multi-modulus equalization.

Objectives. Summarizing the cited refs, we note that coherent communication systems are of particular interest both in wireless and wired optical networks. However, despite impressive scientific researches and practical advances in coherent optical communications, no uniformed theoretical method for truly scalable data coding in diverse coherent channels exhibited so far, but two concurrent alternatives based on Nyquist temporal waveform and Fourier spectral mapping.

This work targets substantiation a unified approach on hybrid spectral/temporal data coding in coherent telecommunication channel to provide an extended scalability around diverse wireless and wired physical media.

Following this, a piecewise linear phase modulation method introduced hereinafter for ternary data coding in a coherent channel, deemed wireless network application and beyond.

Basic principles of piecewise linear phase modulation. The proposed method of digital data coding due to piecewise linear phase modulation in coherent channel is based on the following theoretical principles.

1) The permanently constant power provision for generated output signal while data coding proceeding; this causes near the ideal peak-to-average power ratio ($PAR \rightarrow 1$), and therefore, the minimal technical requirements to

transceiver linearity and dynamics; in turn, the phase variation of main carrier remains the primarily bearer's property for data transfer execution.

2) Strict temporal phase continuity of the main carrier during all the communication process; this enables the overall regularity of data transmission scenario with no extra guard intervals between adjacent symbols; thus, channel performance can unlimitedly scale towards baud rate variation.

3) Precisely linear character of phase modulation function $\phi(t)$ at any open time interval $t \in (0, \infty)$; this means that the first phase derivative $\phi'(t)$ is discrete limited function: $\omega(t) = \phi'(t) \in [0, \pm \omega_1, \pm \omega_2, \dots, \pm \omega_k, \dots, \pm \omega_K]$ everywhere in $t \in (0, \infty)$, where $\omega(t)$ is angular frequency of baseband signal $\phi(t)$; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k, \dots, \omega_K$ are discrete subcarriers measured in "rad/s" units within the limited frequency band ΔF ; so, the baseband signal $\phi(t)$ is a first-order smooth function with discrete and compact spectrum allocation:

$$-\frac{\Delta F}{2} < f_k = \frac{\omega_k}{2 \cdot \pi} < +\frac{\Delta F}{2}. \quad (4)$$

4) Multilayer spectral/temporal data coding of distinct ternary digits for any transferred symbol within the sampling interval $\tau \in (t, t+T)$. On the first layer, solely one ternary digit formed due to the piecewise linear function of phase modulation within the sampling interval $\tau \in (t, t+T)$. In multilayer mode, the sampling interval T is hierarchically segmented in a pyramid of nested time slots, wherein any slot carries a distinct ternary digit of correspondent layer. Respectively, any time slot operates with its own spectral presentation of baseband signal.

Single layer symbol coding with ternary digit presentation. In the simplest case, one layer of data coding used, and therefore, any symbol formed by solely one ternary digit. The figure 1 shows six sampling intervals from $t=0$ to $t=6T$ wherein six ternary digits of the first layer are coded: +1, -1, 0, -1, 0, -1 due to the linear phase variation within the range $|\phi(t)| \leq \frac{\pi}{2}$. The phase signal $\phi(t)$ always begins and ends on the zero phase value (return to zero modulation method, or RTZ). The ternary state of the first layer digit is estimated as an overall assessment on the whole sampling interval $\tau \in (t, t+T)$; herewith, two side harmonics (left and right ones) are generated:

$$\omega_1^- = -\frac{\pi}{2} : \frac{T}{2} = -\frac{\pi}{T} \quad \text{and} \quad \omega_1^+ = +\frac{\pi}{T}.$$

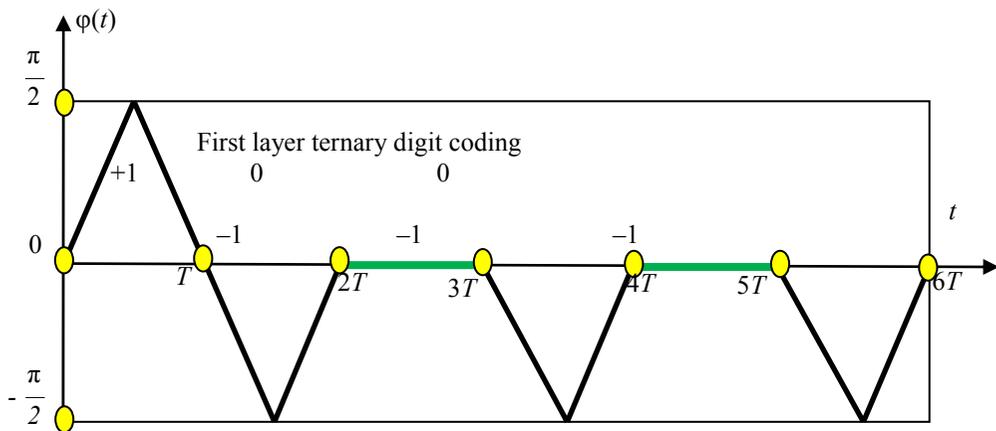


Fig. 1. First layer of data coding with piecewise linear function of phase modulation

The one layer ternary data coding is expedient to minimal transceiver complexity and/or the worst case of signal-to-noise ratio; however, this type of digital data presentation, in contrast to conventional binary data transmission, provides an exhaustive mechanism of serial data stream structuring shaped as formal grammar text which is interpretable by an abstract finite state automaton like Turing machine [15].

As known, Turing machine interprets serial code formed by one or more alphabet letters and one syntax sign (i.e. "space"). The one-letter alphabet based machine is rather primitive and cumbersome implemented; instead, the two-letter formal texts in view of binary scripts are ubiquitously used in modern digital processors and programming languages. For this reason, the ternary coding of digital flow enables comprehensive data processing on the physical layer of communication channel in terms of formal text aware Turing machine. The two states of ternary digit ("– 1" and "+ 1") will be interpreted by Turing machine (i.e. channel processor) as conventional binary bit states 0 and 1, whereas the ternary state "0" understood as syntax sign "space".

We note that even the simplest case of the proposed method for ternary digit coding with solely one layer of symbol presentation significantly extends the scope of coherent signal detection. In fact, the baud rate depends on two variable parameters, i.e. period T and maximal phase deviation $|\phi_{\max}|$. In fig. 1, the maximal phase deviation assumed $|\phi_{\max}| = \frac{\pi}{2}$; though, this value can vary in a wide range $0 < |\phi_{\max}| < \infty$. If here the overall bandwidth is fixed ($\Delta F = const$), then f is limited

$$f_1 < \frac{|\phi_{\max}|}{\pi \cdot T}.$$

On the other hand, if phase derivative module in non-zero digit presentation is fixed (i.e. $|\phi'(t)| = \text{const}$) then period T depends on $|\phi_{\max}|$ as it is clear from fig. 1:

$$\begin{aligned} \left\langle |\omega_1| = |\phi'(t)| = \left| \frac{\Delta\phi_{\max}}{0.5 \cdot T} \right| \right\rangle &\rightarrow \left\langle |2 \cdot \pi \cdot f_1| = \left| \frac{2 \cdot \Delta\phi_{\max}}{0.5 \cdot T} \right| \right\rangle \rightarrow \\ \left\langle |\pi \cdot f_1| = \frac{1}{T} \cdot |\Delta\phi_{\max}| \right\rangle &\rightarrow \left\langle \pi \cdot |f_1| = f_S \cdot |\Delta\phi_{\max}| \right\rangle \rightarrow \\ &\rightarrow f_S = |f_1| \cdot \left| \frac{\pi}{\Delta\phi_{\max}} \right|. \end{aligned}$$

If $|\phi_{\max}| = \frac{\pi}{2}$, then $f_S = 2 \cdot |f_1|$; if $|f_1| = \frac{\Delta F}{2}$, then $f_S = \Delta F$.

This results in the following formula

$$f_S = \frac{\Delta F}{2} \cdot \left| \frac{\pi}{\Delta\phi_{\max}} \right| = \Delta F \cdot \left| \frac{\pi}{2 \cdot \Delta\phi_{\max}} \right|.$$

Define phase modulation factor m

$$m = \frac{|2 \cdot \Delta\phi_{\max}|}{\pi}.$$

Now we obtain the formula for symbol transmission baud rate

$$f_S = \frac{\Delta F}{m}.$$

The related bit rate R is calculated as

$$R = \log_2 N_S \cdot f_S = \log_2 N_S \cdot \frac{\Delta F}{m},$$

where N_S is the number of discrete states in one symbol. If one layer ternary coding used, than 3 states of one digit symbol envisaged

$$R_1 = \log_2 3 \cdot \frac{\Delta F}{m} \approx 1.585 \cdot \frac{\Delta F}{m}. \quad (5)$$

Based on (5), the smooth and accurate channel productivity becomes scalable in a wide range of $0 < R < \infty$ due to variation the phase modulation factor $0 < m < \infty$.

Conclusion. Advanced coherent communication systems open up new opportunities in wireless and optic network engineering, where impressive achievements exhibited recent years. However, a uniformed theoretical basis for data coding in coherent channels is challenging. Approaching this, a novel method of ternary data coding introduced herein for coherent radio/optic channels due to piecewise linear phase modulation. It is imposed by signal power invariance and baseband signal continuity, along with locally linear phase modulation and multilayer symbol shaping. The simplest case of one layer symbol coding studied in the paper. It is expedient to minimal transceiver complexity and/or the worst case of signal-to-noise ratio, still providing a smart mechanism for channel tuning and comprehensive data processing in terms of formal grammar text which is interpretable by finite state automaton like Turing machine. The given approach aims to contribute researches in next generation networking by increasing performance scalability of the coherent channels in a wide spectrum of wired and wireless applications with particular focus on sensor networks and machine-to-machine systems. Further consideration the algorithms of two- and more layered symbol coding assumed hereinafter beyond this paper.

References:

1. International Telecommunication Union – Radio communication Sector (2013), "ITU-R FAQ on International Mobile Telecommunications (IMT)", available at: <http://www.itu.int/en/ITU-R/Documents/ITU-R-FAQ-IMT.pdf>.
2. "Ninth meeting of Working Party 5D on IMT systems" (Chongqing, 13-20 October, 2010), available at: <https://www.itu.int/md/R00-SG05-CIR-0020/en>.
3. Jansson, K., "First in the world with 4G", available at: <http://www.teliacompanyhistory.com/pioneering-the-future/pioneering-the-future/first-in-the-world-with-4g/>.
4. GSMA Intelligence (2014), "Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile", available at: <https://www.gsmainelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download>.
5. "Architecture of the LTE Air Interface," available at: http://www.cs.nccu.edu.tw/~jang/teaching/MobileMgt_files/Architecture%20of%20the%20LTE%20Air%20Interface.pdf.
6. NXP White paper (2008), "Long Term Evolution Protocol Overview", available at: https://www.nxp.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/LTEPTCLOVWWP.pdf.
7. Bertran-Pardo, O. (2013), "Submarine transmissions with spectral efficiency higher than 3 b/s/Hz using Nyquist pulse-shaped channels", *Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC)*, 2013, pp. 79-85.
8. Le Nguyen, Binh (2013), *Digital Processing: Optical Transmission and Coherent Receiving Techniques*, CRC Press, 507 p.
9. Korn, G.A., and Korn, T.M. (2000), *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*, General Publishing Company, 1151 p.
10. Desurvire, E. (2009), *Classical and quantum information theory: an introduction for the telecom scientists*, Cambridge university press, 688 p.

11. Essiambre, R. (2010), "Capacity limits of optical fiber networks", *Journal of Lightwave Technol.* No 28 (4), pp. 662-701.
12. Soto, M.A. (2013), "Optical sinc-shaped Nyquist pulses of exceptional quality", *Nature Communications* 4, available at: <http://www.nature.com/articles/ncomms3898>.
13. Zhang, J. (2014), "High Speed All Optical Nyquist Signal Generation and Full-band Coherent Detection", available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4139967/>.
14. Zhang J. (2014), "Super-Nyquist signal transmission and digital signal processing", *Proc. of the SPIE*, Vol. 9267, 2014, 7 pp, available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014SPIE.9267E.0LZ>.
15. Turing, A.M. (1950), "Computing machinery and intelligence", available at: <https://www.csee.umbc.edu/courses/471/papers/turing.pdf>.

The article is presented by doctor of technical sciences, director of the Institute of Radio, Television and Information Security of "O.S. Popov ONAT" Vasiliu E.V.

Received 16.11.2016

Tikhonov Victor, Dr. Tech. Sci., Professor
Odessa National Academy of Telecommunications
Str. Kuznechna, 1, Odessa Ukraine, 65029
Tel.: 067-752-13-90, e-mail: victor.tykhonov@onat.edu.ua

УДК 621.391

Кусково-лінійна фазова модуляція для кодування трійкових даних у когерентному безпроводному каналі / Тихонов В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – 2016. – №. 44 (1216). – С. 162 – 170.

У статті представлено новий метод комбінованого частотно-часового кодування послідовних символів у радіоканалі з пакетною комутацією, який здійснюється шляхом безперервної фазової модуляції кусково-лінійними функціями. Описано перший рівень багаторівневого представлення символу трійчастими розрядами. Даний метод покращує динамічну адаптацію і розширює можливості масштабування продуктивності каналу. Ил.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: кодування послідовних символів, фазова модуляція, багаторівневого представлення символу, динамічна адаптація.

УДК 621.391

Кусочно-линейная фазовая модуляция для кодирования троичных данных в когерентном беспроводном канале / Тихонов В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – 2016. – №. 44 (1216). – С. 162 – 170.

В статье представлен новый метод комбинированного частотно-временного кодирования последовательных символов в радиоканале с пакетной коммутацией, который осуществляется путем непрерывной фазовой модуляции кусочно-линейными функциями. Описан первый уровень многоуровневого представления символа троичными разрядами. Данный метод улучшает динамическую адаптацию и расширяет возможности масштабирования производительности канала. Ил.: 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: кодирование последовательных символов, фазовая модуляция, многоуровневое представление символа, динамическая адаптация.

UDC 621.391

Piecewise linear phase modulation for ternary data coding in coherent wireless channel / Tikhonov V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – 2016. – №. 44 (1216). – P. 162 – 170.

The paper introduces the novel method of combined time-frequency successive symbol coding in a packet based radio channel, which is performed due to continuous phase modulation by piecewise linear functions. The first layer of multilayered symbol presentation with ternary digits described. This method improves dynamic performance adaptation of the channel and extends its scalability. Figs.: 1. Refs.: 15 titles.

Keywords: symbol coding, phase modulation, multilayered symbol presentation, dynamic performance adaptation.

О.П. ЧЕРНИХ, канд. фіз.-мат. наук, доц., НТУ "ХПІ",
А.В. КОРКОШКО, магістр, НТУ "ХПІ"

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ КЛАСТЕРАМИ СЕРВЕРА

Досліджені основні методи та алгоритми розподілення навантаження. На основі результатів досліджень розроблені алгоритм аналізу коефіцієнта активності інтернет сесій та алгоритм визначення критичного навантаження. За допомогою даних алгоритмів розроблено програмне забезпечення, яке дає можливість уникнути відмови системи із-за перенавантаження. Іл.: 6. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: розподілення навантаження, коефіцієнт активності, інтернет сесія, критичне навантаження.

Постанова проблеми. У століття розвитку індустрії ІТ технологій вже важко уявити собі будь-яке підприємство, яке орієнтовано на комерційну або некомерційну діяльність, без використання автоматизації процесів. Все автоматизується за допомогою серверів, навантаження на які з часом тільки зростають. "Падіння" сервера може відбутися в самий невідповідний момент та загрожувати дуже серйозними моральними і матеріальними наслідками. Проблеми недостатньої продуктивності сервера в зв'язку зі зростанням навантажень можна вирішувати шляхом нарощування потужності сервера або оптимізацією алгоритмів, що використовуються, та програмних кодів.

Аналіз літератури. Так як обчислювальні потужності комп'ютерів вже доходять до межі фізичних можливостей, то доводиться вдаватися до кластеризації. Ефективність кластеризації безпосередньо залежить від того, як розподіляється навантаження між елементами кластера. В багатьох дослідженнях пропонуються різні підходи до проблеми балансування навантаження [1, 2].

Для використання балансування потрібно виділяти наступні цілі [3]:

- справедливість: на обробку кожного запиту виділяються системні ресурси;
- ефективність: всі сервери, які обробляють запити, повинні бути зайняті на 100%;
- скорочення часу виконання запиту: забезпечення мінімального часу між початком обробки запиту (або його постановкою в чергу на обробку) і його завершенням;
- скорочення часу відгуку: потрібно мінімізувати час відповіді на

запит користувача.

Дуже бажано, щоб алгоритм балансування мав наступні властивості [3]:

- передбачуваність: чітке розуміння в яких ситуаціях і при яких навантаженнях алгоритм буде ефективним для вирішення поставлених завдань;

- рівномірне завантаження ресурсів системи;

- масштабування: алгоритм повинен зберігати працездатність при збільшенні навантаження.

Алгоритми балансування навантаження можна поділити на дві категорії: статичні і динамічні [4, 5]. Процедура балансування може здійснюватися відповідно рівням моделі OSI: мережевого, транспортного, прикладного.

Процедура балансування може здійснюватися за допомогою алгоритмів балансування [3, 6]:

- 1) алгоритм Round Robin або алгоритм кругового обслуговування;

- 2) алгоритм Weighted Round Robin;

- 3) алгоритм Least Connections;

- 4) алгоритм Destination Hash Scheduling;

- 5) алгоритм Sticky Sessions.

Для комерційних додатків [7] електронні магазини найчастіше використовують алгоритм Sticky Sessions. Цей алгоритм розподілу вхідних запитів гарантує, що запити одного і того ж клієнта будуть передаватися на один і той же сервер.

Більшість відомих розподілювачів навантаження забезпечують розподілення навантаження без функціональності, яка б допомогла розвантажити вузол, вони лише можуть виключити її на деякий час з кільця розподілення навантаження, тобто нові інтернет сесії не будуть закріплюватися за цим вузлом.

Одна з існуючих проблем розподілення навантаження – зменшення навантаження на сервер у випадку критичного перенавантаження та нестачі ресурсів для роботи з задовільною продуктивністю. Описаний підхід у даній статті дозволяє вирішити дану проблему.

Мета статті – розробка програмного забезпечення для комплексного балансування навантаження з можливістю перенесення існуючого навантаження між вузлами кластера і здатністю до легкої інтеграції в існуючі програми.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені основні задачі:

- розробка алгоритму визначення коефіцієнту активності інтернет сесії;

- розробка алгоритму визначення критичного навантаження;

– програмна реалізація розподілення навантаження з перевизначенням найактивніших сесій на ненавантажені вузли.

Розробка алгоритму визначення коефіцієнту активності інтернет сесії. На рис. 1 наведений алгоритм обробки запиту методом Sticky Session. З цього алгоритму видно, що кожна сесія стійко закріплюється за вузлом і до кінця свого життєвого циклу оброблюється ним.

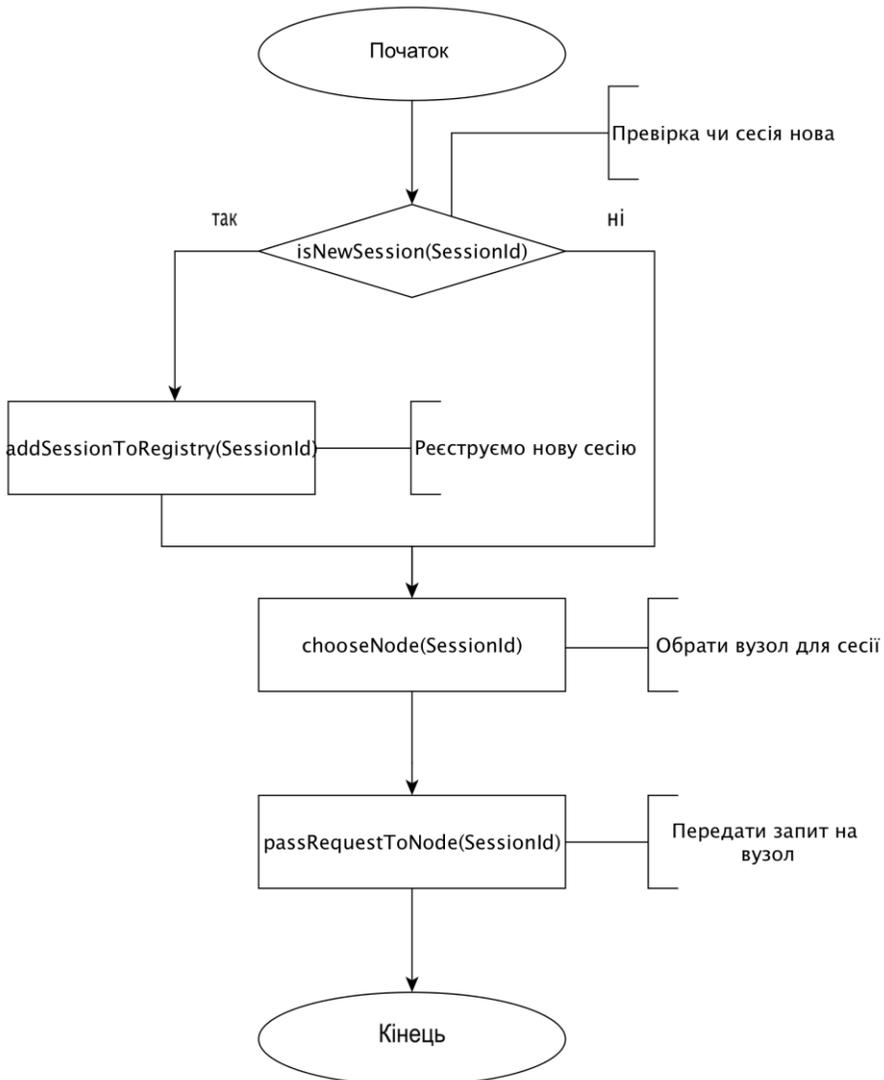


Рис. 1. Алгоритм обробки запиту методом Sticky Session

Метод Sticky Session має недоліки:

- можливе перенавантаження вузла у разі нерівномірного розподілення навантаження, яке не можливо передбачити;
- у випадку динамічного кластеру неможливо перерозподілити навантаження та вимкнути зайві потужності, що призводить до матеріальних втрат.

На рис. 2 наведений алгоритм обробки запиту методом Dynamic Sticky Session, який був розроблений.

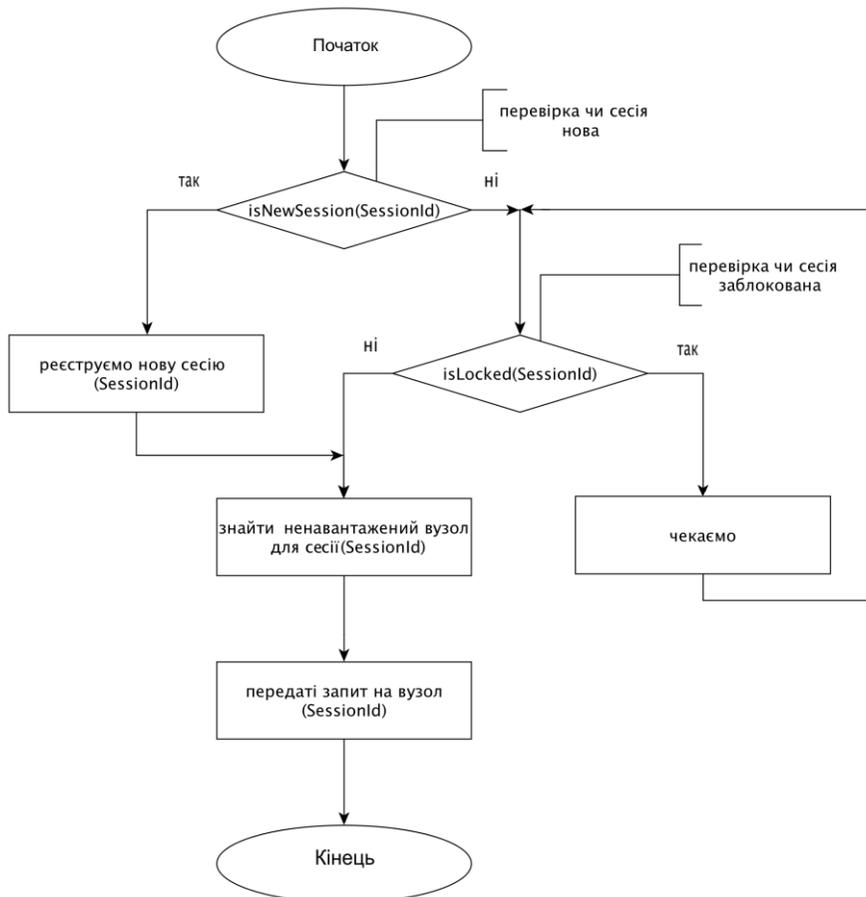


Рис. 2. Алгоритм обробки запиту методом Dynamic Sticky Session

Цей алгоритм не відрізняється від оригінального алгоритму методу Sticky Session. Але незначна модифікація насправді дуже важлива. Вона дозволяє переміщувати сесії між вузлами. Коли сесія повинна бути переміщена, виконується її блокування, за що відповідає операція

IsLockedSession. Надана можливість переміщення сесій дозволяє повністю вирішити недоліки методу Sticky Session [8].

Розробка алгоритму визначення критичного навантаження. На рис. 3 пропонується алгоритм, за яким виконується розвантаження вузла, якщо він у критичному стані. Комп'ютерна система "Session Thrower Load Balancer", яка була розроблена, реалізує метод Dynamic Sticky Session та виконує операцію, яка дозволяє за конфігурований проміжок часу тримати кластер в оптимальному стані.

Розробка комп'ютерної системи для підвищення продуктивності. Комп'ютерна система "Session Thrower Load Balancer" – є програмним забезпеченням для всіх операційних систем, для яких реалізована специфікація JVM (Java Virtual Machine). Функціональні характеристики розробленої системи:

- балансування навантаження методом sticky session;
- легкість інтеграції;
- здатність конфігурувати правила для кожного вузла;
- розвантаження вузла під час виконання;
- будівництва онлайн графіка навантаження для кожного вузла.

Система визначена як набір спеціальних програмних інструментів, які допомагають в рівномірному розподіленні навантаження між вузлами кластера. Для розрахунку навантаження вузла визначені наступні метрики:

- кількість зайнятої оперативної пам'яті;
- рівень навантаження центрального процесору.

За допомогою розробленого інструмента виконується обчислення часу, яке вузол витратив на обробку запитів кожної сесії. Значення може змінюватися від 0 до 10000.

Розрахунок виконувався за наступною формулою

$$P = t/T * 100, \quad (1)$$

де P – значення активності сесії; t – час витрачений на обробку запитів кожної сесії; T – загальний час виміру.

На кожний запит користувача генерується звіт з кількістю часу, який було витрачено на запит. За кожний зазначений проміжок часу генерується загальний звіт і відправляється на розподільвач навантаження для подальшої обробки і розподілення навантаження.

Розроблений інструмент складається з розподільвача навантаження Session Thrower Load Balancer (STLB) та клієнтського модулю STLB Client, який буде інтегруватися з існуючими застосуваннями.

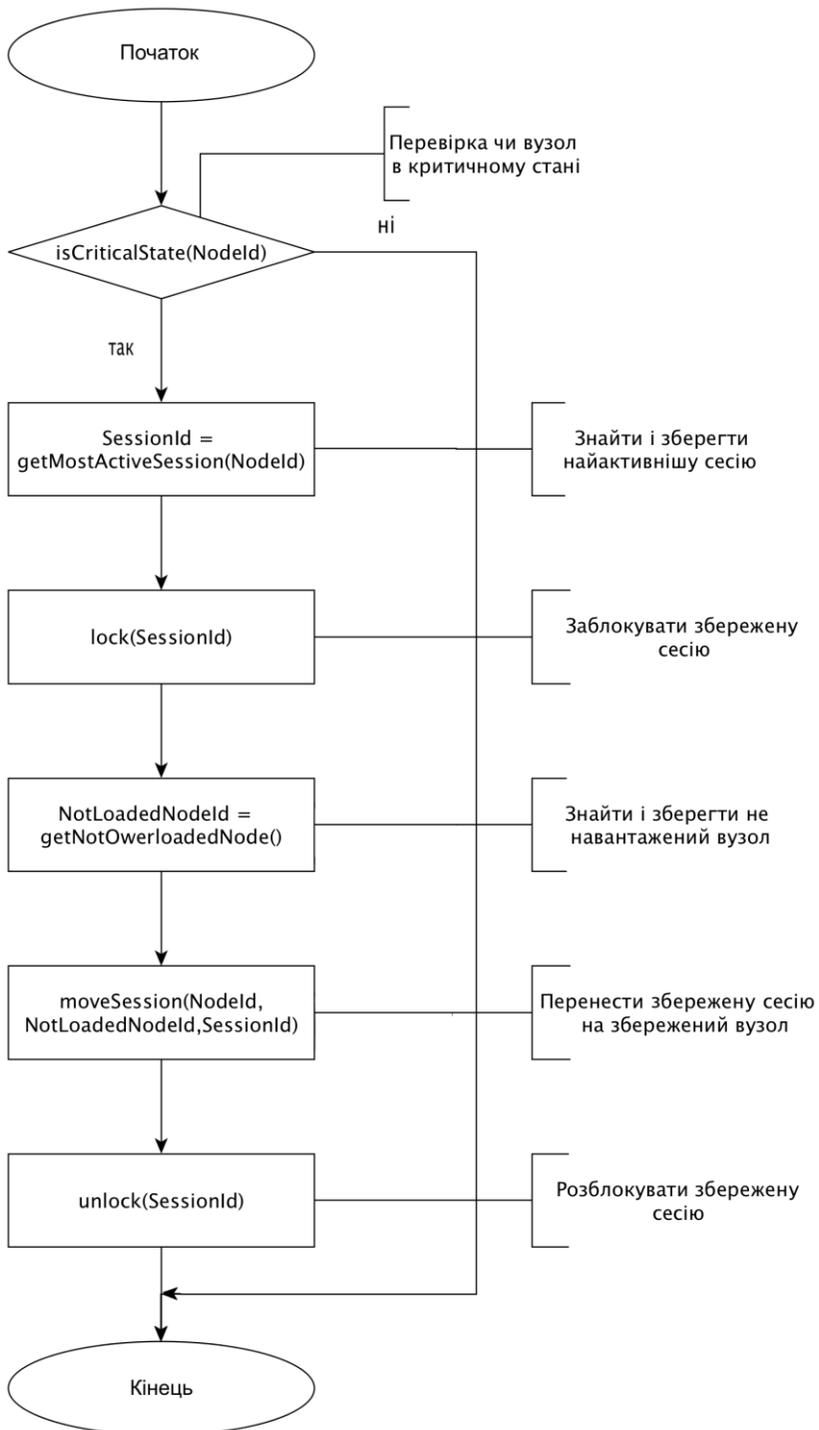


Рис. 3. Алгоритм розвантаження вузла

Для зручності та простоти інтеграції було обрано один з найпопулярніших контейнерів застосувань на мові програмування Java, Spring. Також була розроблена архітектура, з якою можна було інтегруватися за найменший проміжуток часу та з мінімум зусиль.

Для автоматизації зборки проекту використано Apache Maven – фреймворк для автоматизації збирання проектів, специфіковані на XML-мові POM (Project Object Model). Maven, на відміну від іншого збирача проектів Apache Ant, забезпечує декларативну, а не імперативну збірку проекту. Усі завдання з обробки файлів Maven виконує через плагіни. При використанні Maven у проекті використовується чітка структура розташування каталогів.

В пропанованій системі реалізована можливість перегляду службової інформації, яка постійно приходить на розподільвач навантаження. Її можна переглянути на онлайн графіках: навантаження центрального процесору, навантаження ОЗУ, навантаження процесора програмою застосування (рис. 4 – 6).

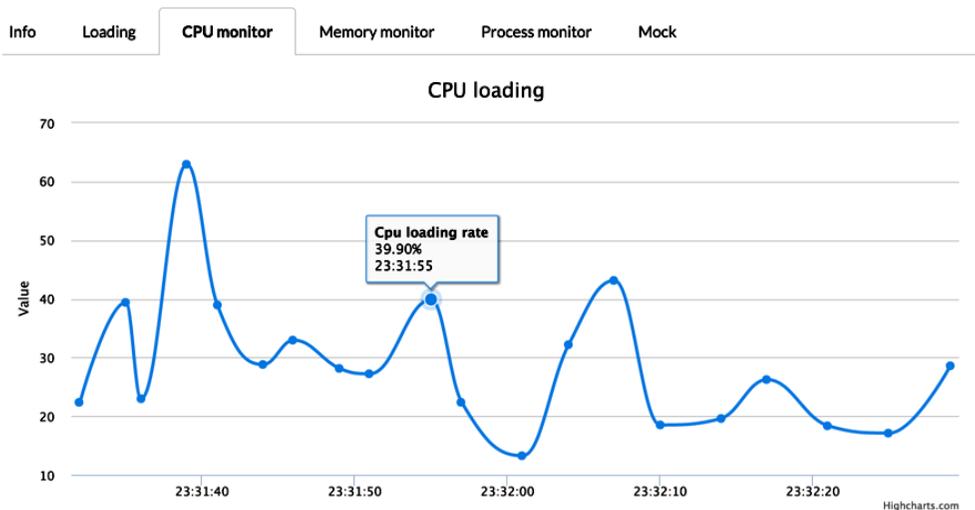


Рис. 4. Графік навантаження центрального процесору

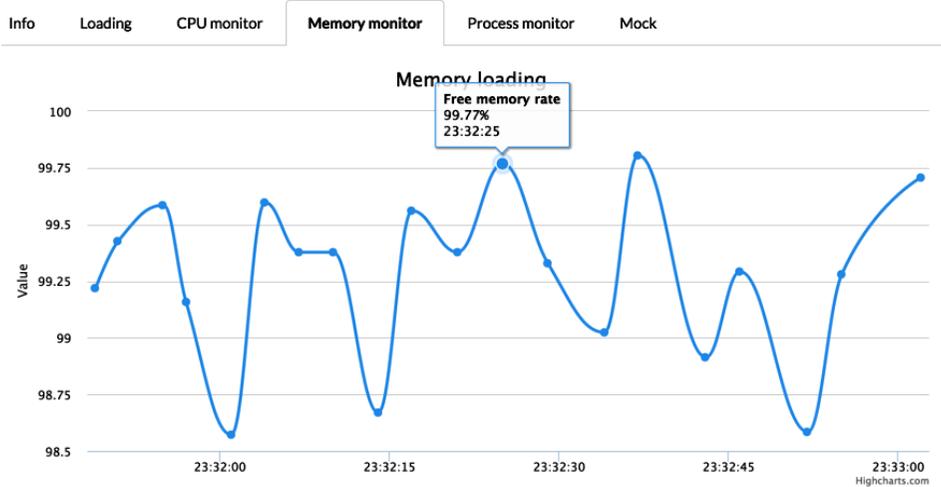


Рис. 5. Графік навантаження ОЗУ

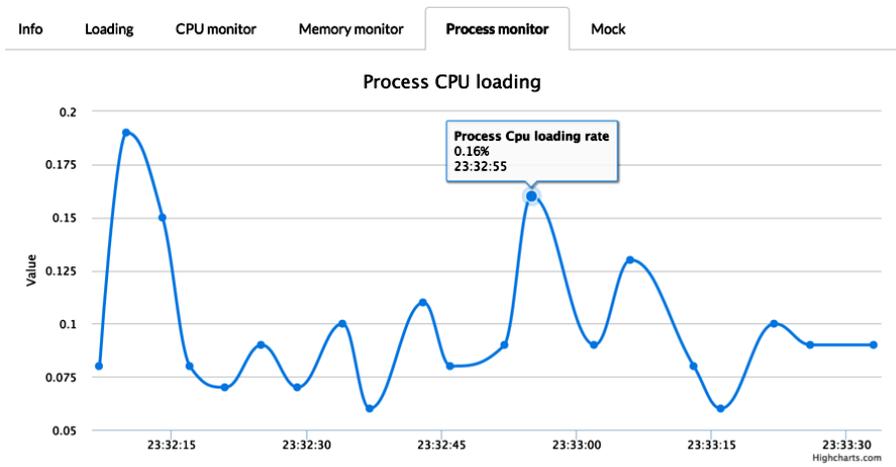


Рис. 6. Графік загрузки пам'яті програмою застосування

Висновки. Таким чином, розроблено програмне забезпечення "Session Throwing Load Balancer" реалізує новий спосіб розподілення навантаження методом перезакріплення сесій. Це значно покращує продуктивність та відмовостійкість всього кластера. За допомогою цього програмного забезпечення можливо проводити моніторинг та аналіз навантаження на кожному вузлі та редагувати правила розподілення навантаження в разі надзвичайних ситуацій.

Список літератури: 1. Жуков І.А. Методи балансування навантаження для web-серверів / І.А. Жуков // Проблеми інформатизації та управління. – 2007. – № 3 (21). – С. 46-54. 2. Chulhye P. A fuzzy-based distributed load balancing algorithm for large

distributed systems / P. Chulhye, J.G. Kuhl // Proceedings of the Second International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. – 1995. – P. 266-273. **3.** Часовских А. Обзор алгоритмов кластеризации данных. – Режим доступа [www. URL: http://habrahabr.ru/post/101338/](http://habrahabr.ru/post/101338/) – 11.08.2010. **4.** Эндрюс Г.П. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования / Г.П. Эндрюс. – М.: Вильямс, 2003. – 512 с. **5.** Топорков В.В. Модели распределенных вычислений / В.В. Топорков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с. **6.** Шаповал І.С. Адаптивний алгоритм балансування навантаження в комп'ютерних мережах / І.С. Шаповал // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції аспірантів і студентів "Інженерія програного забезпечення 2010". – 2010. – № 3. – С. 26-35. **7.** Коркошко А.В. Исследование методов построения приложений электронной коммерции с высокой скоростью и надёжностью / А.В. Коркошко, О.П. Черних // Матеріали ІХ Університетської науково-практичної студентської конференції магістрів НТУ "ХПІ". – 2015. – С. 74. **8.** Коркошко А.В. Розробка програмного модулю для підвищення продуктивності взаємодії між кластерами сервера / А.В. Коркошко, О.П. Черних // Матеріали ХХІV Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – 2016. – Ч. ІV. – С.148.

References:

1. Zhukov, I.A. (2007), "The methods of load balancing for web-servers", *Problems of information and management*, 3 (21), pp. 46-54.
2. Chulhye, P. and Kuhl, J.G. (1995), "A fuzzy-based distributed load balancing algorithm for large distributed systems", *Proceedings of the Second International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, April 1995, pp. 266-273.
3. Chasovskyh, A. (2010), "Review of data clustering algorithms", <http://habrahabr.ru/post/101338/>. – (accessed 11.08.2016).
4. Andrews, G.R. (2003), *Fundamentals of multi-threaded, parallel and distributed programming*, M.: Williams, 512 p.
5. Toporkov, V.V. (2004), *Models of distributed computing*, M.: FIZMATLIT, 320 p.
6. Shapoval, I.S. (2010), The adaptive algorithm of load balancing in computer networks. *Proceedings of the international Scientific Conference of Graduate and Students "Engineering software 2010"*, 2010, No. 3, p. 26-35.
7. Korkoshko, A.V. and Chernykh, E.P. (2015), "Investigation of construction methods of e-commerce applications with high speed and reliability", *IX University Scientific-Practical Student Conference Master NTU "HPI"*, April 2015, p. 74.
8. Korkoshko, A.V. and Chernykh, E.P. (2016), "Development of the module for increased performance interaction between server clusters", *XXIV International Scientific-Practical Conference "Information Technology, Science, Engineering, Technology, Education, Health"*, May 2016, Part. IV, p.148.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Леонов С.Ю.

Надійшла (received) 09.08.2016

Chernykh Olena, Cand. Phys.- Math. Sci., Docent
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
tel./phone: +38 (098) 427-01-52, e-mail: lenachernikh@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-3883-8645

Korkoshko Andrii, PhD
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Pushkinskaya, 79/5, Kharkov, Ukraine, 61024
tel./phone: +38 (099) 279-01-40, e-mail: demosoft@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-4567-5584

УДК 004.07

Розробка програмного забезпечення для підвищення продуктивності взаємодії між кластерами сервера / Черних О.П., Коркошко А.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 171 – 181.

Досліджені основні методи та алгоритми розподілення навантаження. На основі результатів досліджень розроблені алгоритм аналізу коефіцієнта активності інтернет сесій та алгоритм визначення критичного навантаження. За допомогою даних алгоритмів розроблено програмне забезпечення, яке дає можливість уникнути відмови системи із-за перенавантаження. Ил.: 6. Библиогр.: 8 назв.

Ключові слова: розподілення навантаження, коефіцієнт активності, інтернет сесія, критичне навантаження.

УДК 004.07

Разработка программного обеспечения для повышения производительности взаимодействия между кластерами сервера / Черных А.П., Коркошко А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 171 – 181.

Исследованы основные методы и алгоритмы распределения нагрузки. На основе результатов исследований разработаны алгоритм анализа коэффициента активности интернет сессий и алгоритм определения критической нагрузки. С помощью этих алгоритмов разработано программное обеспечение, которое дает возможность избежать отказа системы из-за перегрузки. Ил.: 6. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: распределение нагрузки, коэффициент активности, интернет сессия, критическая нагрузка.

UDC 004.07

Development software to improve the performance of interaction between server clusters / Chernykh O.P., Korkoshko A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 44 (1216). – P. 171 – 181.

The basic techniques and load balancing algorithms were investigated. Based on the research results the algorithm of analyzes the activity coefficient of the Internet sessions and the algorithm for determining the critical load were developed. With using these algorithms the software was designed which avoids system failure due to overloading. Figs.: 6. Refs.: 8 titles.

Keywords: load balancing, activity coefficient, Internet session, the critical load.

ЗМІСТ

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах 3

Математические методы и модели

Бердичевский Е.Г. Применение нечетких логик для моделирования показателей технической эстетики 5

Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Главчев Д.М. Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ 14

Иванов Д.Е., Ткаченко В.Н. Генетический алгоритм идентификации параметра лучистого теплообмена в заданных граничных условиях 31

Котов И.А. Автоматизация интеллектуальных систем поддержки решений оперативного управления путем инкорпорации профессиональных онтологий 42

Косолап А.І., Кодола Г.М. Оптимізація в задачах лінійного розкреду матеріалів 56

Павленко В.Д., Павленко С.В., Романов Д.Ю. Исследование точности и вычислительной устойчивости регуляризованного метода идентификации нелинейных систем 67

Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Костюк В.Е. Моделирование аэродинамических процессов водотрубного парового котла ДКВР(ДЕ)-10/14 79

Шейкус А.Р., Левчук И.Л., Тришкин В.Я., Корсун В.И. Моделирование парожидкостного равновесия при подвижном управлении процессами ректификации 87

Новые информационные технологии в медицине и биологии

Скарга-Бандурова І.С., Білобородова Т.О. Пошуковий аналіз даних для визначення релевантних факторів гіпоксичного ураження плода 102

Тітова А.Ю. Розробка моделі формування термограми молочних залоз на основі перетворення температурних показників термографа 116

Новые средства информатики, вычислительной техники и системный анализ

<i>Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Скидан Р.А., Рябов А.М.</i> База данных для проведения научных исследований "Моделирование процессов инновационного развития бальнеологических курортных территорий"	126
<i>Защелкин К.В., Иванова Е.Н.</i> Адаптация метода внедрения цифровых водяных знаков F5 к среде LUT-ориентированных информационных контейнеров	135
<i>Семенов С.Г., Лисица Д.А., Мовчан А.В.</i> GERT-модель начальной генерации кода кибератаки несанкционированного доступа к ресурсам компьютерной системы одноранговой сети	147
<i>Tikhonov V.I.</i> Piecewise linear phase modulation for ternary data coding in coherent wireless channel	162
<i>Черних О.П., Коркошко А.В.</i> Розробка програмного забезпечення для підвищення продуктивності взаємодії між кластерами сервера ..	171

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 44 (1216)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 37 – 16

Підп. до друку 23.12.2016 р. Формат 70x100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Виготовлено у ТОВ ВПП "Контраст".
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 40, оф. 221.
Св-во: ДК №1778 від 05.05.2004