

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 62 (968) 2012

Сбірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2012

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968) – 204 с.

Державне видання

Свідectво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською 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 постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. № 1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України № 6, 2010 р., стор. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л.Л. Тovaжнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

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

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф.; Є.Є. Олександров, 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. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В.В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.М. Кошельник, 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.; В.І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

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

Відповідальний секретар: С.Ю. Леонов, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Л.В. Дербунович, д-р техн. наук, проф.; Є.Г. Жилияков, д-р техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; І.І. Обод, д-р техн. наук, проф.; А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.; О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.

З номеру 42'2012 Вісник НТУ "ХПІ" має власну розширену нумерацію: № 42 (948) 2012.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 11 від 21 грудня 2012 р.

ISSN 2079-0031

© Національний технічний університет "ХПІ", 2012

Д.С. БІРЮКОВ, канд. техн. наук, старший консультант, НІСД, Київ,
В.А. ЗАСЛАВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., КНУ ім. Тараса
Шевченка, Київ,

А.І. СІДЛЯРЕНКО, аспірант. КНУ ім. Тараса Шевченка, Київ

КРИТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ: НА ПРИКЛАДІ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

В роботі запропонована постановка задачі оптимізації, яка полягає у визначенні плану перевезення осіб при евакуації населення автомобільними транспортними засобами з населених пунктів, що знаходяться в зоні ураження під час надзвичайної ситуації.

Ключові слова: евакуація населення, критична інфраструктура, надзвичайна ситуація, автомобільні транспортні засоби.

Постановка проблеми та аналіз літератури. Термін критична інфраструктура (КІ) увійшов в обіг ділового, наукового та дипломатичного спілкування з середини 1990-х рр., і спочатку був пов'язаний з інформаційною інфраструктурою. На сьогодні КІ – це великомасштабні фізичні або віртуальні системи та ресурси, втрата яких може призводити до неусувних наслідків для економіки та політичної стабільності держави, здоров'я населення [1, 2]. До елементів КІ прийнято відносити енергетичні системи, транспортні магістральні мережі, нафто- та газопроводи, системи супутникового зв'язку та життєзабезпечення мегаполісів, служби екстреної допомоги населенню та реагування на надзвичайні ситуації (НС), державні органи влади, високотехнологічні та оборонні підприємства тощо.

Умови НС висувають підвищені вимоги до функціонування елементів КІ, створюють специфічні обмеження, які потрібно враховувати при формуванні планів реагування, розробці математичних моделей, методів та програмних систем підтримки прийняття рішень. При реагуванні на НС техногенного (аварія на об'єкті підвищеної небезпеки) або природного характеру (повені, сильні снігопади, т.і.) автомобільні дороги є одним з основних способів доставки аварійних бригад та рятувальників, медичного обладнання та персоналу, інженерно-технічних та транспортних пасажирських засобів.

Досвід реагування на НС та проведення евакуації населення з постраждалих внаслідок НС територій показує, що необхідно враховувати, зокрема, завантаженість, вузькі ділянки та інтенсивність руху по окремим ділянкам автодоріг [3], мати резервні маршрути та

запаси ресурсів [4], враховувати роботу аварійно-рятувальних бригад [5] та відновлення ділянок автошляхів [6]. Розв'язування таких задач здійснюється із застосуванням евристичних та наближених методів [7 – 9].

Розв'язуючи задачу визначення параметрів перевезення населення та пересування автотранспортних засобів, які дозволять евакуювати населення, мінімізувавши ризик зараження людей (очікувану чисельність загиблих), необхідно враховувати: характеристики зараження території (що змінюються в часі), отримані, наприклад, на основі використання моделі просторового переносу отруйних речовин від об'єктів підвищеної небезпеки; пропускну спроможність автомобільних доріг в залежності від умов (розвитку ситуації); наявність автотранспортних засобів та палива в населених пунктах; чисельність населення та кількість місць тимчасового розміщення евакуйованих осіб.

Мета статті – розробити математичну задачу планування перевезення осіб автомобільними транспортними засобами при евакуації з населених пунктів, що знаходяться в зоні ураження під час НС.

Формальна постановка задачі. Мережа автодоріг представлена графом $G = (V, E)$, в якому вершини $v_i \in V$, $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, відповідають населеним пунктам та перехрестям автодоріг, а дуги $(v_i, v_j) \in E$, $v_i, v_j \in V$ – ділянкам автодоріг. Позначимо E_i^+ – множина індексів вершин, які є суміжними з v_i , $i \in I$.

Позначимо $x_{ij}(t)$ – заплановане перевезення населення на момент $t \in (0, t^*)$ (чисельність осіб, яких відправляють з вершини v_i у вершину v_j), $y_{ij}(t)$ – потужність (спроможність перевезення населення – кількість місць в автотранспорті) запланованої передислокації автотранспорту в момент $t \in (0, t^*)$ з вершини v_i у вершину v_j .

Кожна вершина на момент часу $t \in (0, t^*)$ характеризується набором показників, які залежать від $x_{ij}(t)$ та $y_{ij}(t)$, $j \in E_i^+$: $n_i(\bullet, t)$ – чисельність населення; $a_i(\bullet, t)$ – потужність (кількість місць для пасажирів) автотранспортних ресурсів; $e_i(\bullet, t)$ – обсяг наявних паливних ресурсів; та r_i – кількістю місць для тимчасового розміщення евакуйованих осіб.

В залежності від виду НС (техногенна аварія, природне лихо) стан оточуючого середовища $s_i(t)$ в кожному пункті, яким відповідають

вершини $v_i, i \in I$, може належати до одного стану із деякої скінченної множини $S = \{1, 2, \dots, m\}$ (кожному стану відповідає діапазон рівнів забруднення території). Нехай задані $p_i^{(s)}(t)$ – ймовірності перебування вершини $v_i, i \in I$ в стані s на момент часу t та $h^{(s)} (s \in S)$ – ймовірності загибелі людини на території, що перебуває в умовах перебування в населеному пункті в стані $s \in S$. Наприклад, при розрахунку радіаційного зараження території внаслідок аварії можна використати моделі та програмні комплекси, розроблені авторами роботи [10].

Нехай для кожного ребра $(v_i, v_j) \in E$ задані значення таких характеристик: $c_{ij}(t)$ – пропускна спроможність автодороги; d_{ij} – відстань; v_{ij}^1 – швидкість перевезення осіб автотранспортом при евакуації; v_{ij}^0 – швидкість передислокації порожнього автотранспорту.

Тоді можна записати різниці рівняння для чисельності населення у пунктах (вершинах графу):

$$n_i(\bullet, t + \Delta t) = n_i(\bullet, t) + \sum_{j \in E_i^+} x_{ji}(t) \cdot \Delta t \cdot v_{ji}^1 / d_{ji} - \sum_{j \in E_i^+} x_{ij}(t) \cdot \Delta t \cdot v_{ij}^1 / d_{ij}.$$

Звідси запишемо диференціальне рівняння та початкові умови:

$$\frac{dn_i(\bullet, t)}{dt} = \sum_{j \in E_i^+} (v_{ji}^1 x_{ji}(t) - v_{ij}^0 x_{ij}(t)) / d_{ij}, \quad n_i(\bullet, 0) = n_i^0 - \sum_{j \in E_i^+} x_{ij}(0), \quad i \in I,$$

де n_i^0 – задані значення, $i \in I$. Подібні диференціальні рівняння можна записати для наявних автотранспортних засобів та палива:

$$\frac{da_i(\bullet, t)}{dt} = \sum_{j \in E_i^+} (v_{ji}^1 (x_{ji}(t) - x_{ij}(t)) + v_{ji}^0 (y_{ji}(t) - y_{ij}(t))) / d_{ij},$$

$$\frac{de_i(\bullet, t)}{dt} = \sum_{j \in E_i^+} C_E (v_{ji}^1 (x_{ji}(t) - x_{ij}(t)) + v_{ji}^0 (y_{ji}(t) - y_{ij}(t))),$$

де C_E – коефіцієнт витрат палива, а початкові умови матимуть вигляд:

$$a_i(\bullet, 0) = a_i^0 - \sum_{j \in E_i^+} (x_{ij}(0) + y_{ij}(0)) \quad \text{та} \quad e_i(\bullet, 0) = e_i^0 - \sum_{j \in E_i^+} C_E d_{ij} x_{ij}(0), \quad i \in I,$$

a_i^0, e_i^0 – задані значення, $i \in I$.

Тоді задача полягає у виборі плану транспортування, який мінімізує людські втрати, можливі внаслідок зараження території, і має вигляд:

$$\text{мінімізувати} \quad \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \int_0^{t^*} h^{(s)} \cdot p_i^{(s)}(t) \cdot n(\bullet, t) dt, \quad (1)$$

$$\text{при умовах:} \quad e_i(\bullet, t) \geq 0, \quad a_i(\bullet, t) \geq 0, \quad n_i(\bullet, t) \geq 0, \quad i \in I, \quad t \in (0, t^*), \quad (2)$$

$$\sum_{j \in E_i^+} (x_{ij}(t) + y_{ij}(t)) \leq a_i(\bullet, t), \quad i \in I, \quad t \in (0, t^*), \quad (3)$$

$$\sum_{j \in E_i^+} x_{ij}(t) \leq n_i(\bullet, t), \quad i \in I, \quad t \in (0, t^*), \quad (4)$$

$$y_{ij}(t) + x_{ij}(t) \leq c_{ij}(t), \quad (v_i, v_j) \in E, \quad t \in (0, t^*), \quad (5)$$

$$0 \leq y_{ij}(t), \quad 0 \leq x_{ij}(t), \quad (v_i, v_j) \in E, \quad t \in (0, t^*), \quad (6)$$

$$n_i(\bullet, t^*) \leq n_i(\bullet, 0) + r_i, \quad i \in I. \quad (7)$$

Умова (2) задає невід'ємність об'ємів паливних ресурсів, транспортних засобів та кількості населення в пунктах на весь період планування; (3) означає, що запланована кількість перевезень не перевищує наявної кількості транспортних засобів; (4) – кількість осіб, що планується вивезти з пункту не перевищує наявної кількості населення; (5) – автошлях дозволяє здійснювати перевезення заданої потужності; (6) – невід'ємність чисельності осіб, яких заплановано перевезти, та потужності (кількості місць в автотранспорті) запланованого перевезення; (7) – обмеження на кількість місць для тимчасового розміщення евакуйованого населення.

Висновки. Задача планування евакуації населення автомобільним транспортом у випадку надзвичайної ситуації, що загрожує здоров'ю людей на значній території, є складною як в плані моделювання, так і з точки зору розробки алгоритму розв'язування. В даній роботі запропонована модель, що дозволяє здійснювати оптимальне управління транспортними перевезеннями при евакуації.

Модель (1) – (7) є суттєвим спрощенням реальної ситуації. Шляхами її вдосконалення є модифікація критерію (1) задля врахування граничних (смертельних) і перехідних станів здоров'я евакуйованих осіб, чисельності осіб та часу їх перебування на території певного рівня зараження, врахування груп ризику (діти, особи літнього віку, жінки), а також врахування особливостей аварій (необхідність санітарної обробки транспорту, неможливість його повторного використання після дезактивації при радіаційній аварії, т.і.).

Список літератури: 1. Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT, 2001) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://frwebgate.access.gpo.gov> 2. European programme for critical infrastructure protection (COM/2006/786 final). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

http://eur-lex.europa.eu 3. Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites / Georgiadou P.S. et al. // Reliab. Eng. & Sys. Safety. – 2007. – 92 (10). – P. 1388 – 1402. 4. Zaslavsky V. Risk analyses and redundancy for protection of critical infrastructure / V. Zaslavsky, Y. Ievgiienko // Monographs of System Dependability / Edt. J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, W. Zamojski. – Wrocław: Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010 – P.161 – 173. 5. Kimms A. Cell-transmission-based evacuation planning with rescue teams / A. Kimms, K.-C. Maassen // J. Heuristics. – 2012. – 18 (3). – P. 435 – 471. 6. Yan S. Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution / S. Yan, Y.-L. Shih // Computers & Oper. Res. – 2009. – 36. – P. 2049 – 2065. 7. Chen Y. Emergency Evacuation Model and Algorithms / Y. Chen, D. Xiao // J. Transport. Sys. En-g & IT. – 8 (6). – 2008. – P. 96 – 100. 8. Tuydes H. Tabu-based heuristic approach for optimization of network evacuation contraflow / H. Tuydes, A. Ziliaskopoulos // Transport. Res. Record. – 2006. – № 1964. – P. 157–168. 9. Liu Y. Two-level integrated optimization system for planning of emergency evacuation / Y. Liu, X.R. Lai, G.L. Chang // J. Transport. En-g. – 2006. – 132 (10). – P. 800 – 807. 10. Бончук Ю.В. Программный комплекс анализа дозиметрической обстановки при аварийных выбросах АЭС Украины / Ю.В.Бончук, Н.Н.Талерко, А.Г.Кузьменко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2009. – Вип. 12. – С.30–39.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф., зав. кафедри прикладної статистики КНУ ім. Тараса, м. Київ Є.О. Лебедев.

УДК 519.87; 517.9

Критическая инфраструктура в условиях чрезвычайных ситуаций: на примере сети автомобильных дорог / Бирюков Д.С., Заславский В.А., Сидляренко А.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – №. 62 (968). – С. 3 – 7.

В работе предложена постановка задачи оптимизации, которая заключается в определении плана перевозки людей при эвакуации населения во время чрезвычайной ситуации с территорий (населенных пунктов), находящихся в зоне поражения, автомобильными транспортными средствами. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: эвакуация населения, критическая инфраструктура, чрезвычайная ситуация, автомобильные транспортные средства.

UDC 519.87; 517.9

Critical infrastructure under conditions of emergency situation: a case of road network / Biriukov D.S., Zaslavskii V.A., Sidlyarenko A.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 3 – 7.

The paper presents the optimization problem formulation of determination the transportation plan for human evacuation from an emergency in areas (settlements) that are in the danger zone by automotive vehicles. Refs: 10 titles.

Keywords: evacuation planning, critical infrastructure, emergency, automotive vehicles.

Надійшла до редакції 02.08.2012

А.Ф. ВЕРЛАНЬ, д-р техн. наук, Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Киев,

Б.А. ХУДАЯРОВ, д-р техн. наук, зав. каф., Ташкентский институт ирригации и мелиорации, Ташкент,

Э.Ф. ФАЙЗИБОВЕВ, проф., Ташкентский институт ирригации и мелиорации, Ташкент,

З.У. ЮЛДАШЕВ, ст. преп., Ташкентский институт ирригации и мелиорации, Ташкент

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛАТТЕРА ВЯЗКОУПРУГИХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

В работе рассматривается нелинейный флаттер вязкоупругих ортотропных пластин в сверхзвуковом потоке газа. Уравнения движения получены на основе наиболее общей теории пластин Фёппля-Кармана в перемещениях, для которых справедливы гипотезы Кирхгоффа. Аэродинамическое давление учитывается согласно поршневой теории А.А. Ильюшина. При помощи метода Бубнова – Галеркина, основанного на многочленной аппроксимации перемещений, задача сведена к исследованию системы обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений (ИДУ), где независимой переменной является время. Решение ИДУ находится численным методом, основанным на использовании квадратурных формул. Разработаны методика и алгоритм численного решения интегро-дифференциальных уравнений. Определены критические скорости флаттера ортотропных пластин в потоке газа. Табл.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: вязкоупругая ортотропная пластина, алгоритм, интегро-дифференциальное уравнение, флаттер, пластина.

Постановка проблемы и анализ литературы. Большинство конструктивных элементов летательного аппарата, покрытых тонкой обшивкой, можно схематизировать либо в виде прямоугольных, либо в виде цилиндрических панелей или оболочек. Различие в геометрии этих элементов не является чисто формальным признаком и в значительной степени обуславливает специфику их аэроупругого поведения. В силу этого задачи моделирования панельного флаттера можно разбить на две большие группы. Первая включает задачи, относящиеся к плоским пластинам, вторая содержит задачи, связанные с цилиндрическими панелями и оболочками. Математическому моделированию флаттера упругих элементов второй группы посвящено большое количество теоретических исследований. Однако моделированию задач флаттера вязкоупругих пластин, цилиндрических и пологих оболочек посвящено сравнительно небольшое количество работ. Последнее объясняется специфическими аналитическими трудностями исследования пластин,

цилиндрических и пологих оболочек. Потребности новой техники, в особенности бурно развивающейся авиационной промышленности за последние пятьдесят лет, определили необходимость развития нелинейной теории пластин и оболочек в сверхзвуковом потоке газа.

В настоящее время задача учета наследственных эффектов деформируемых материалов представляет большой теоретический и прикладной интерес. Ее решение представляет собой эффективное приложение теории вязкоупругости к реальным процессам. Поэтому методы и проблемы теории наследственной упругости привлекают большое внимание исследователей.

Математическое моделирование динамических задач о колебаниях и устойчивости вязкоупругих систем является также весьма актуальным в связи с тем, что, с одной стороны, расширяются возможности использования в авиационной промышленности и других отраслях машиностроения материалов, обладающих ярко выраженными вязкоупругими свойствами, а с другой стороны, при использовании наследственных моделей [1 – 4] для описания внутреннего демпфирования материала уравнения колебаний упругих систем записываются в такой же форме, как и для вязкоупругих систем. Часто при рассмотрении упругих систем внутреннее трение материала учитывается с помощью модели Фойгта, хотя известно, что даже в системах с конечным числом степеней свободы, большим единицы, она приводит к некорректным результатам, поскольку для большинства материалов внутреннее трение фактически не зависит или, по крайней мере, слабо зависит от скорости колебаний в достаточно широком частотном диапазоне. В этом смысле более предпочтительной является модель, отображающая наследственные свойства [5].

Задача нелинейного флаттера ортотропной прямоугольной пластинки, обтекаемой сверхзвуковым потоком газа была впервые рассмотрена в работе [6], где для аэродинамических сил использовалась приближенная формула "поршневой теории". В работе [7] задача решается в нелинейной постановке для трехслойной ортотропной пластинки. Позднее [8] эта задача рассматривалась для упругих ортотропных панелей, а динамический процесс рассмотрен без учета распространения упругих волн, однако в вязкоупругой постановке задача не исследована.

В связи с этим **целью данной статьи** и является теоретическое исследование нелинейного флаттера вязкоупругих ортотропных пластин, обтекаемых в потоке газа.

Постановка задачи. Рассмотрим прямоугольную вязкоупругую ортотропную пластинку со сторонами a и b , которая обтекается с одной стороны сверхзвуковым потоком газа со скоростью V . Аэродинамическое давление учитываем по поршневой теории А.А. Ильюшина [2].

Нелинейные уравнения движения вязкоупругих ортотропных пластин выпишем в виде:

$$B_{11}^* \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + B_{12}^* \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) +$$

$$+ B^* \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$B_{22}^* \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + B_{21}^* \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) +$$

$$+ B^* \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$

$$\frac{h^2}{12} \left\{ B_{11}^* \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + [8B^* + B_{12}^* + B_{21}^*] \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_{22}^* \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right\} -$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} \left[B_{11}^* \frac{\partial u}{\partial x} + B_{12}^* \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial w}{\partial y} B^* \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} -$$

$$- \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial w}{\partial y} \left[B_{21}^* \frac{\partial u}{\partial x} + B_{22}^* \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial w}{\partial x} B^* \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} +$$

$$+ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{B}{h} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{BV}{h} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{B_1 V^2}{h} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 = 0, \quad (3)$$

где $B_{ij}^* = b_{ij}(1 - R_{ij}^*)$; ($i, j = 1, 2$); $B^* = b(1 - R^*)$; R_{ij}^* , R^* – интегральные

операторы: $R^* \varphi(t) = \int_0^t R(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau$, $R_{ij}^* \varphi(t) = \int_0^t R_{ij}(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau$; $R(t - \tau)$,

$R_{ij}(t - \tau)$ – ядра релаксации, определяемые при рассмотрении одноосной задачи; ρ – плотность материала; h – толщина оболочки.

Граничные условия будут иметь вид:

$$w = 0; v = 0; N_x = 0; M_x = 0 \text{ при } x = 0, x = a;$$

$$w = 0; u = 0; N_y = 0; M_y = 0 \text{ при } y = 0, y = b.$$

Этим условиям удовлетворим, представляя искомые функции $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ и $w(x, y, t)$ в виде

$$\begin{aligned} u(x, y, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{nm}(t) \cos \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}, \\ v(x, y, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M v_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b}, \\ w(x, y, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (4)$$

Исследуем случай пластинки, шарнирно опертой по контуру, совершающей колебания с образованиями n и m полуволн вдоль координатных линий x и y . Решение уравнений (1) – (3), удовлетворяющее граничным условиям задачи, будем искать в виде (4). Подставляя (4) в систему (1) – (3) и применяя метод Бубнова-Галеркина, получим систему ИДУ. Введя в ИДУ следующие безразмерные величины $\frac{x}{a}$, $\frac{y}{b}$, $\frac{u}{h}$, $\frac{v}{h}$, $\frac{w}{h}$, $\frac{V_\infty t}{a}$, и сохраняя при этом прежние обозначения, запишем

$$\begin{aligned} \ddot{u}_{kl} + (a_{10}C_{11}^* + a_{11}C^*)u_{kl} + (a_{12}C_{12}^* + a_{13}C^*)v_{kl} + \\ + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left[(a_{16}C_{11}^* + a_{17}C^*)\Delta_{1klmnr} - (a_{18}C_{12}^* + a_{19}C^*)\Delta_{2klmnr} \right] w_{nm} w_{ir} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \ddot{v}_{kl} + (a_{20}C_{22}^* + a_{21}C^*)v_{kl} + (a_{22}C_{21}^* + a_{23}C^*)u_{kl} + \\ + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left[(a_{26}C_{22}^* + a_{27}C^*)\Delta_{3klmnr} - (a_{28}C_{21}^* + a_{29}C^*)\Delta_{4klmnr} \right] w_{nm} w_{ir} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{w}_{kl} + M\dot{w}_{kl} + (a_{30}C_{11}^* + a_{31}C_{12}^* + a_{32}C_{22}^* + a_{33}C^*)w_{kl} + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M b_{2klmnr} C_{12}^* w_{nm} w_{ir} + \\ + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M w_{nm} \left\{ d_{1klmnr} C_{11}^* + d_{2klmnr} C_{21}^* + d_{3klmnr} C^* \right\} u_{ir} + (d_{4klmnr} C_{12}^* + \\ + d_{5klmnr} C_{22}^* + d_{6klmnr} C^*) v_{ir} + (d_{7klmnr} C_{11}^* + d_{8klmnr} C_{12}^* + d_{9klmnr} C_{22}^*) w_{ir} \Big\} + \\ + \aleph \lambda M_p \left(2\lambda_1 M^* \sum_{n=1}^N \gamma_{nk} w_{n1} + \frac{\aleph+1}{4} M^{*2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \Gamma_{klmnr} w_{nm} w_{ir} \right) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned}
 a_{10} &= \pi^2 k^2 \Delta; & a_{11} &= \pi^2 l^2 \lambda^2 g; & a_{12} &= \pi^2 kl \lambda \Delta; & a_{13} &= \pi^2 kl \lambda g; \\
 a_{16} &= \pi n i^2 \Delta / \lambda_1; & a_{17} &= \pi n r^2 \lambda^2 g / \lambda_1; & a_{18} &= \pi m i r \lambda^2 \Delta / \lambda_1; \\
 a_{19} &= \pi m i r \lambda^2 g / \lambda_1; & a_{20} &= \pi^2 \lambda^2 l^2 / \Delta; & a_{21} &= \pi^2 k^2 g; & a_{22} &= \pi^2 \lambda k l / \Delta; \\
 a_{23} &= \pi^2 k l \lambda g; & a_{26} &= \pi \lambda^3 r^2 m / (\Delta \lambda_1); & a_{27} &= \pi m i^2 \lambda g / \lambda_1; \\
 a_{28} &= \pi \lambda n i r / (\Delta \lambda_1); & a_{29} &= \pi n i r \lambda g / \lambda_1; \\
 a_{30} &= \frac{\pi^4 k^4 \Delta}{12 \lambda_1^2}; & a_{31} &= \frac{\lambda^4 \pi^4 \Delta}{6 \lambda_1^2}; & a_{33} &= \frac{\lambda^4 \pi^4 g}{3 \lambda_1^2}; & a_{32} &= \frac{1}{\Delta} \frac{\lambda^4 \pi^4 l^4}{12 \lambda_1^2}; \\
 d_{1klnmir} &= \lambda_1 n i \Delta \pi (n \Delta_{7klnmir} + i \Delta_{5klnmir}); & d_{5klnmir} &= \lambda^2 m i (r \Delta_{6klnmir} - \\
 & - m \Delta_{7klnmir}) / (\Delta \lambda_1); & d_{2klnmir} &= \beta_1 n \Delta k_x (i \Delta_{5klnmir} - n \Delta_{7klnmir}); \\
 d_{3klnmir} &= r \lambda^2 \Delta \pi (i m \Delta_{6klnmir} + n r \Delta_{5klnmir} - 2 n r \Delta_{8klnmir}) / \lambda_1; & d_{8klnmir} &= \lambda^2 m r \pi \times \\
 \times (\lambda r \Delta_{6klnmir} - m \Delta_{7klnmir}) / (\Delta \lambda_1); & d_{9klnmir} &= m \lambda^2 (\lambda_1 r k_y \Delta_{6klnmir} - m \beta_1 k_x \Delta_{7klnmir}) / \Delta; \\
 d_{6klnmir} &= (-n m r g \pi \lambda \Delta_{8klnmir} (\lambda + 1) + m i r \pi g \lambda^2 \Delta_{6klnmir} + n r^2 \pi g \lambda^2 \Delta_{5klnmir}) / \lambda_1; \\
 d_{7klnmir} &= (-n m i g \pi \lambda \Delta_{8klnmir} (\lambda + 1) + m i^2 \pi g \lambda \Delta_{6klnmir} + n i r \pi g \lambda \Delta_{5klnmir}) / \lambda_1; \\
 d_{4klnmir} &= n \beta_1 k_y \Delta (i \Delta_{5klnmir} - n \Delta_{7klnmir}) + m \lambda^2 k_x (r \beta_1 \Delta_{6klnmir} - m \Delta_{7klnmir}) / \lambda_1 / \Delta; \\
 C_{11}^* &= \frac{1 - R_{11}^*}{1 - \mu_1 \mu_2}; & C_{12}^* &= \frac{\mu_2 (1 - R_{12}^*)}{1 - \mu_1 \mu_2}; & C_{21}^* &= \frac{\mu_1 (1 - R_{21}^*)}{1 - \mu_1 \mu_2}; \\
 C_{22}^* &= \frac{1 - R_{12}^*}{1 - \mu_1 \mu_2}; & C^* &= 1 - R^*; & \Delta &= \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}; & g &= \frac{G}{\sqrt{E_1 E_2}}.
 \end{aligned}$$

Требуется найти критическую скорость флаттера $V_{кр}$, из решения системы ИДУ (5) – (7), удовлетворяющую начальным условиям:

$$\begin{aligned}
 u_{nm}(0) &= u_{0nm}, & \dot{u}_{nm}(0) &= \dot{u}_{0m}, & v_{nm}(0) &= v_{0nm}, & \dot{v}_{nm}(0) &= \dot{v}_{0m}, & w_{nm}(0) &= w_{0nm}, \\
 \dot{w}_{nm}(0) &= \dot{w}_{0m}.
 \end{aligned}$$

Для решения задачи нелинейного флаттера вязкоупругих ортотропных пластинок, описываемой системой ИДУ (5) – (7), используем численный метод, основанный на применении квадратурных формул [9, 10].

Интегрируя систему (5) – (7) два раза по t , запишем ее в интегральной форме и с помощью рационального преобразования исключим слабо-сингулярные особенности интегрального оператора R^* . Затем, полагая $t = t_i$, $t_i = i \Delta t$, $i = 1, 2, \dots$ ($\Delta t = const$) и заменяя интегралы

квадратурными формулами трапеций для вычисления $u_{ikl} = u_{kl}(t_i)$, $v_{ikl} = v_{kl}(t_i)$ и $w_{ikl} = w_{kl}(t_i)$, получим следующие рекуррентные формулы для ядра Колтунова – Ржаницына:

$$\begin{aligned}
 u_{pkl} = & u_{0kl} + \dot{v}_{okl} t_p - \sum_{j=0}^{p-1} A_j (t_p - t_j) \left\{ a_{10} \left(u_{jkl} - \frac{A_{11}}{\alpha_{11}} \sum_{s=0}^j B_s^{(11)} \exp(-\beta_{11} t_s) u_{j-skl} \right) + \right. \\
 & + \frac{a_{11}}{\mu_{12}} \left(u_{jkl} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) u_{j-skl} \right) + \frac{a_{13}}{\mu_{12}} \left(v_{jkl} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) v_{j-skl} \right) + \\
 & + a_{12} \mu_2 \left(v_{jkl} - \frac{A_{12}}{\alpha_{12}} \sum_{s=0}^j B_s^{(12)} \exp(-\beta_{12} t_s) v_{j-skl} \right) + \\
 & + \sum_{n,j=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left[\Delta_{1klmnr} a_{16} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{11}}{\alpha_{11}} \sum_{s=0}^j B_s^{(11)} \exp(-\beta_{11} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) + \right. \\
 & + \Delta_{1klmnr} \frac{a_{17}}{\mu_{12}} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) - \\
 & - \Delta_{2klmnr} a_{18} \mu_2 \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{12}}{\alpha_{12}} \sum_{s=0}^j B_s^{(12)} \exp(-\beta_{12} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) - \\
 & \left. - \Delta_{2klmnr} \frac{a_{19}}{\mu_{12}} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) \right] \left. \right\} \mu_{12} = 0, \\
 v_{pkl} = & v_{0kl} + \dot{v}_{okl} t_p - \sum_{j=0}^{p-1} A_j (t_p - t_j) \left\{ a_{20} \left(v_{jkl} - \frac{A_{22}}{\alpha_{22}} \sum_{s=0}^j B_s^{(22)} \exp(-\beta_{22} t_s) v_{j-skl} \right) + \right. \\
 & + \frac{a_{21}}{\mu_{12}} a_{21} \left(v_{jkl} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) v_{j-skl} \right) + \frac{a_{23}}{\mu_{12}} \left(u_{jkl} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) u_{j-skl} \right) + \\
 & + a_{22} \mu_1 \left(u_{jkl} - \frac{A_{21}}{\alpha_{21}} \sum_{s=0}^j B_s^{(21)} \exp(-\beta_{21} t_s) u_{j-skl} \right) + \\
 & + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left[\Delta_{3klmnr} a_{26} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{22}}{\alpha_{22}} \sum_{s=0}^j B_s^{(22)} \exp(-\beta_{22} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) + \right. \\
 & + \Delta_{3klmnr} \frac{a_{27}}{\mu_{12}} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) - \\
 & - \Delta_{4klmnr} a_{28} \mu_1 \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{21}}{\alpha_{21}} \sum_{s=0}^j B_s^{(21)} \exp(-\beta_{21} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) - \\
 & \left. - \Delta_{4klmnr} \frac{a_{29}}{\mu_{12}} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) \right] \left. \right\} \mu_{12} = 0,
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left[\Delta_{3klmnr} a_{26} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{22}}{\alpha_{22}} \sum_{s=0}^j B_s^{(22)} \exp(-\beta_{22} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) + \right. \\
 & + \Delta_{3klmnr} \frac{a_{27}}{\mu_{12}} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) - \\
 & - \Delta_{4klmnr} a_{28} \mu_1 \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{21}}{\alpha_{21}} \sum_{s=0}^j B_s^{(21)} \exp(-\beta_{21} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) - \\
 & \left. - \Delta_{4klmnr} \frac{a_{29}}{\mu_{12}} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) \right] \left. \right\} \mu_{12} = 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
w_{pkl} = & \frac{\mu_{12}}{1 + A_p M \lambda} \left\{ w_{0kl} + \left(\dot{w}_{0kl} + M \lambda w_{0kl} \right) t_p - \sum_{j=0}^{p-1} A_j \left(M_p w_{jkl} - \right. \right. \\
& - (t_p - t_j) \left[\frac{\aleph \lambda M_p}{\mu_{12}} \left(2\lambda_1 M^* \sum_{n=1}^N \gamma_{kn} w_{jnl} + \frac{\aleph+1}{4} M^{*2} \sum_{n,l=1}^N \sum_{m,r=1}^M \Gamma_{klmnr} w_{jnm} w_{jir} \right) \right] + \\
& + a_{30} \left(w_{jkl} - \frac{A_{11}}{\alpha_{11}} \sum_{s=0}^j B_s^{(11)} \exp(-\beta_{11} t_s) w_{j-skl} \right) + a_{31} \mu_2 \left(w_{jkl} - \frac{A_{12}}{\alpha_{12}} \sum_{s=0}^j B_s^{(12)} \exp(-\beta_{12} t_s) w_{j-skl} \right) + \\
& + a_{32} \left(w_{jkl} - \frac{A_{22}}{\alpha_{22}} \sum_{s=0}^j B_s^{(22)} \exp(-\beta_{22} t_s) w_{j-skl} \right) + \frac{a_{33}}{\mu_{12}} \left(w_{jkl} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-skl} \right) + \\
& + \sum_{n,l=1}^N \sum_{m,r=1}^M \mu_2 b_{2klmnr} \left(w_{jnm} w_{jir} - \frac{A_{12}}{\alpha_{12}} \sum_{s=0}^j B_s^{(12)} \exp(-\beta_{12} t_s) w_{j-snm} w_{j-sir} \right) + \\
& + \sum_{n,j=1m,r=1}^N \sum_{m,r=1}^M w_{jnm} \left\langle d_{1klmnr} \left(u_{jir} - \frac{A_{11}}{\alpha_{11}} \sum_{s=0}^j B_s^{(11)} \exp(-\beta_{11} t_s) u_{j-sir} \right) + \right. \\
& + \mu_1 d_{2klmnr} \left(u_{jir} - \frac{A_{21}}{\alpha_{21}} \sum_{s=0}^j B_s^{(21)} \exp(-\beta_{21} t_s) u_{j-sir} \right) + \frac{d_{3klmnr}}{\mu_{12}} \left(u_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \times \right. \\
& \times \exp(-\beta t_s) u_{j-sir} \left. \right) + \mu_2 d_{4klmnr} \left(v_{jir} - \frac{A_{12}}{\alpha_{12}} \sum_{s=0}^j B_s^{(12)} \exp(-\beta_{12} t_s) v_{j-sir} \right) + \\
& + d_{5klmnr} \left(v_{jir} - \frac{A_{22}}{\alpha_{22}} \sum_{s=0}^j B_s^{(22)} \exp(-\beta_{22} t_s) v_{j-sir} \right) + \frac{d_{6klmnr}}{\mu_{12}} \left(v_{jir} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \times \right. \\
& \times \exp(-\beta t_s) v_{j-sir} \left. \right) + \mu_2 d_{8klmnr} \left(w_{jir} - \frac{A_{12}}{\alpha_{12}} \sum_{s=0}^j B_s^{(12)} \exp(-\beta_{12} t_s) w_{j-sir} \right) + \\
& \left. + d_{7rlmnr} \left(w_{jir} - \frac{A_{11}}{\alpha_{11}} \sum_{s=0}^j B_s^{(11)} \exp(-\beta_{11} t_s) w_{j-sir} \right) + d_{9klmnr} \left(w_{jir} - \frac{A_{22}}{\alpha_{22}} \sum_{s=0}^j B_s^{(22)} \exp(-\beta_{22} t_s) w_{j-sir} \right) \right\rangle \Bigg\},
\end{aligned} \tag{10}$$

где $p = 1, 2, \dots$; $k = \overline{1, N}$; $l = \overline{1, M}$.

На основе этого алгоритма создан пакет прикладных компьютерных программ. Результаты вычислений представлены в таблице.

Таблица

Зависимость критической скорости флаттера от физико-механических и геометрических параметров пластинки

Δ	g	μ_1	μ_2	λ	λ_1	материал панели	$V_{кр}$
5,0129	1,1088	0,3	0,012			вязкоупругий	980
4,8482	0,0226	0,26	0,017				892
3,0976	0,1549	0,02	0,32	2,5	50		615
2,2761	0,1398	0,15	0,01963				463
2,1467	0,1356	0,13	0,023				440
5,0129	1,1088	0,3	0,012	2,1	50	вязкоупругий	532
				2,3			734
				2,6			1124
				2,8			1433
5,0129	1,1088	0,3	0,012	2,5	40	вязкоупругий	1022
					45		725
					50		532
5,0129	1,1088	0,3	0,012	2,5	50	вязкоупругий	985
							1062
							1341
2,2761	0,1398	0,15	0,01963	2,5	50	упругий вязкоупругий	625 463

Проведены расчеты для вязкоупругих ортотропных пластин применительно к пяти маркам стеклопластика: $\Delta = 5,0129$; $g = 1,1088$;

$\mu_1 = 0,3$; $\mu_2 = 0,012$ (марка 1); ($\Delta = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$; $g = \frac{G}{\sqrt{E_1 E_2}}$; E_1, E_2 –

линейные модули упругости; G – модуль сдвига; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона); $\Delta = 4,8482$; $g = 0,0226$; $\mu_1 = 0,26$; $\mu_2 = 0,017$ (марка 2); $\Delta = 3,0976$; $g = 0,1549$; $\mu_1 = 0,02$; $\mu_2 = 0,32$ (марка 3); $\Delta = 2,2761$; $g = 0,1398$; $\mu_1 = 0,15$; $\mu_3 = 0,01963$ (марка 4); $\Delta = 2,1467$; $g = 0,1356$; $\mu_1 = 0,13$; $\mu_2 = 0,023$ (марка 5). Результаты расчета для этих марок стеклопластика представлены в первых пяти строках таблицы. Видно, что критическая скорость (при постоянных λ и λ_1) сильно зависит от свойств материала.

Изучено влияние вязкоупругих свойств пластинки для марки 4. Критическая скорость для упругой пластинки составляет 625 м/с, а для вязкоупругой пластинки 463 м/с. Разница между ними составляет 25,9%.

Исследовалось влияние параметра λ (отношение длины стороны a к b) на критическую скорость флаттера вязкоупругих ортотропных пластин, материал которых относится к стеклопластикам марки 1. С ростом параметра λ увеличивается протяженность пластины в направлении течения и происходит сближение удлиненных краев

пластины. Последнее способствует повышению относительной жесткости и росту критической скорости, которое можно проследить по табл. При $\lambda = 2,1$ эта скорость равна 532 м/с. С увеличением параметра λ до 2,8, критическая скорость возрастает в 2,69 раза.

Далее исследовано влияние параметра относительной толщины λ_1 (отношение стороны a к толщине h пластинки) на критическую скорость флаттера. Для $\lambda_1 = 40, 45$ и 50 значения $V_{кр}$ соответственно равны 1022, 725 и 532, то есть с уменьшением толщины стенок пластинки (с увеличением параметра λ_1) критическая скорость флаттера уменьшается.

Выводы. На основании полученных результатов можно заключить, что учет вязкоупругих свойств материала пластинки приводит к уменьшению критической скорости флаттера $V_{кр}$, с которой начинается явление флаттера.

Отметим также, что при скорости потока меньшей, чем $V_{кр}$, влияние вязкоупругого свойства материала уменьшает амплитуду и частоту колебаний. Если же скорость потока превышает $V_{кр}$, то вязкоупругое свойство материала оказывает уже дестабилизирующее влияние.

Список литературы: 1. Григолоук Э.И. Нелинейное деформирование тонкостенных конструкций // Э.И. Григолоук, В.И. Мамай. – М.: Наука: Физматлит, 1997. – 272 с. 2. Ильюшин А.А. Закон плоских сечений в аэродинамике больших сверхзвуковых скоростей // А.А. Ильюшин // Прикладная математика и механика. – 1956. – Т. XX. – Вып. 6. – С. 733–755. 3. Кочнева Л.Ф. Внутреннее трение в твердых телах при колебаниях // Л.Ф. Кочнева. – М.: Наука, 1979. – 96 с. 4. Сорокин Е.С. Об учете упругих несовершенств материалов методами наследственной упругости // Е.С. Сорокин, Г.Б. Муравский. – Строит. механика и расчет сооружений. – 1975. – № 4. – С. 41–46. 5. Потанов В.Д. Исследование динамической устойчивости вязко-упругих систем с помощью показателей Ляпунова // В.Д. Потанов. – Известия АН. Механика твердого тела. – 2000. – № 6. – С. 82–90. 6. Амбарцумян С.А. Об устойчивости ортогтропных пластинок, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа // С.А. Амбарцумян, Ж.Е. Багдасарян. – Известия АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение. – 1961. – № 4. – С. 91–96. 7. Багдасарян Ж.Е. Об устойчивости трехслойной ортогтропной пластинки в сверхзвуковом потоке газа // Ж.Е. Багдасарян. – Известия АН Арм. ССР, Физико-математические науки. – 1961. – XIV. – № 5. – С. 21–29. 8. Jehad F.A. Nonlinear Flutter of Orthotropic Composite panel Under Aerodynamic Heating // F.A. Jehad, R.A. Ibrahim, F.G. Ronald. – J. AIAA. – 1993. – Vol. 31. – № 8. – P. 1256–1268. 9. Бадалов Ф.Б. О некоторых методах решения систем интегродифференциальных уравнений, встречающихся в задачах вязкоупругости // Ф.Б. Бадалов, Х. Эшматов, М. Юсуфов. – Прикладная математика и механика. – 1987. – Т. 51. – № 5. – С. 867–871. 10. Верлань А.Ф. Численное решение нелинейных задач динамики вязкоупругих систем // А.Ф. Верлань, Х. Эшматов, Б. Худаяров, Ш.П. Бобоназаров. – Электронное моделирование. – 2004. – Т. 26. – № 3. – С. 3–14.

УДК 539.3

Комп'ютерне моделювання флаттеру в'язкопружних ортотропних пластин в надзвуковому потоці газу / Верлань А.Ф., Худаяров Б.А., Файзибоев Е.Ф., Юлдашев З.У. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 8 – 17.

У роботі розглядається нелінійний флаттер в'язкопружних ортотропних пластин у надзвуковому потоці газу. Рівняння руху отримані на основі найбільш спільної теорії пластин Феппля-кармана в переміщеннях, для яких справедливі гіпотези Кірхгофа. Аеродинамічний тиск враховується згідно поршневої теорії А.А. Л'юшина. За допомогою методу Бубнова-Галеркіну, заснованого на багаточленній апроксимації перемішень, завдання зведене до дослідження системи звичайних інтегро-дифференціальних рівнянь (ІДУ), де незалежною змінною є час. Рішення ІДУ знаходиться чисельним методом, заснованим на використанні квадратурних формул. Розроблені методика і алгоритм чисельного рішення інтегро-дифференціальних рівнянь. Визначені критичні швидкості флаттеру ортотропних пластин у потоці газу. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: в'язкопружні ортотропні пластини, алгоритм, інтегро-дифференціальне рівняння, флаттер, пластина.

UDC 539.3

Computer modeling of flutter of viscoelastic orthotropic plates in supersonic flow / Verlan A.F., Khudayarov B.A., Fayziboyev E.F., Yuldashev Z.U. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 8 – 17.

This paper considers the nonlinear flutter of viscoelastic orthotropic plates in supersonic flow. The equations of motion derived from the most general theory of plates Foppl-Karman in displacements, which satisfy the Kirchhoff hypothesis. Aerodynamic pressure is accounted for under the piston theory A.A. Lyushin. Using the Bubnov - Galerkin method based on polynomial approximation of displacements, the problem is reduced to the study of a system of ordinary integro-differential equations (IDE), where the independent variable is time. The IDE is a numerical method based on quadrature formulas. The technique and algorithm for the numerical solution of integro-differential equations. The critical velocity of flutter of orthotropic plates in a gas stream. Computational experiment in task about flutter of viscoelastic plate, streamlined under arbitrary corner, in stream of gas. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: viscoelastic orthotropic plates, algorithm, integro-differential equations, flutter, plates.

Поступила в редакцію 06.08.2012

Е.В. ВОЛЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., Институт информатики и искусственного интеллекта ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет", Донецк

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ ВЗВЕШЕННОГО КОНКУРЕНТНОГО СХОДСТВА

В работе предложено естественное расширение области использования функции конкурентного сходства на взвешенные обучающие выборки w -объектов в адаптивных системах распознавания. Описан принцип классификации объектов методом k -ближайших соседей на основе функции взвешенного конкурентного сходства ($wFRiS$ -функции). Приведены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие эффективность предложенного подхода. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: адаптивная система распознавания, w -объект, функция взвешенного конкурентного сходства, метод k -ближайших соседей.

Постановка проблемы и анализ литературы. Построение классификаторов в обучающихся системах распознавания невозможно без оценки степени близости классифицируемого объекта к каждому из классов системы с помощью выбранной меры [1, 2]. Используемые в системах распознавания меры близости условно можно разделить на два вида [3]:

- абсолютные, позволяющие находить конкретное численное значение – расстояние от классифицируемого объекта до объектов выбранного класса;
- относительные, позволяющие оценить, к какому из классов системы классифицируемый объект находится ближе, чем к другим классам.

При принятии решения о классификации предпочтительнее использование относительных мер близости, поскольку они позволяют непосредственно дать ответ на вопрос о классификации на основе анализа всех классов системы, выбрав ближайший из них. Одной из наиболее эффективных относительных мер близости в обучающихся системах распознавания на сегодняшний день является функция конкурентного сходства ($FRiS$ -функция), предложенная в [3, 4]. Существенными преимуществами данной меры являются: независимость от закона распределения объектов, одинаковые значения меры при анализе равноудаленных объектов, ограниченность диапазона $[-1; 1]$ и простая интерпретируемость получаемых значений. Величина

конкурентного сходства классифицируемого объекта X_s с ближайшим объектом X_1 первого класса в сравнении с ближайшим объектом X_2 второго класса вычисляется по формуле [4]:

$$F_{X_1/X_2}(X_s) = \frac{R(X_2, X_s) - R(X_1, X_s)}{R(X_2, X_s) + R(X_1, X_s)}, \quad (1)$$

где $R(X_a, X_b)$ – функция расстояния между объектами a и b .

Классифицируемый объект X_s относится к первому классу, если $F_{X_1/X_2}(X_s) \in [0, 1]$ и ко второму классу, если $F_{X_1/X_2}(X_s) \in [-1, 0)$.

Использование FRIS-функции в решающих правилах, например, в методе k -ближайших соседей [3], существенно ускоряет процесс классификации и, при этом, обеспечивает достаточно высокую эффективность классификации.

Отличительной особенностью адаптивных систем распознавания, рассматриваемых в данной работе, является возможность постоянного пополнения обучающих данных. Необходимость пополнения обучающих выборок в адаптивных системах распознавания вызвана в большинстве случаев изменениями в объектах (значениях их признаков), происходящих в процессе функционирования систем [5]. Это, в свою очередь, приводит к неограниченному росту обучающих выборок и необходимости постоянной корректировки решающих правил классификации. Именно поэтому для адаптивных систем распознавания предпочтительным является использование решающих правил, не требующих существенных временных затрат на их построение.

В предыдущих работах автора [6 – 8] для эффективного функционирования адаптивных систем распознавания была предложена, теоретически обоснована и подтверждена экспериментально идея перехода к взвешенным обучающим выборкам w -объектов. Каждый объект такой выборки кроме значений признаков описывается дополнительной характеристикой, названной весом w -объекта. В качестве веса предложено использовать:

- данные о топологических свойствах обучающей выборки (плотность объектов в некоторой области пространства признаков, расстояние между выбранными объектами и др.) [6, 7];

- показатели уверенности классификации w -объекта группой экспертов [8];

– значения, обусловленные особенностями рассматриваемых объектов, или априорно полученные от экспертов.

При этом определение классификации объектов на основе взвешенных обучающих выборок выполнялось с использованием абсолютной меры близости, что, как указано выше, может увеличивать трудоемкость классификации.

Целью данной работы является уменьшение трудоемкости классификации за счет расширения области применения функции конкурентного сходства на взвешенные обучающие выборки w -объектов в адаптивных системах распознавания.

Постановка задачи. Пусть имеется некоторая конечная взвешенная обучающая выборка w -объектов $X^W = \{X_1^W, X_2^W, \dots, X_k^W\}$. Каждый w -объект X_i^W этой выборки описывается системой признаков $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\} \in R^n$, т.е. представляется точкой в линейном пространстве признаков, и весом p_i – целым положительным числом, тогда $X_i^W = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, p_i\}$. Для каждого w -объекта известна его классификация $y_i \in V$, где $V = \{V_1, \dots, V_l\}$ – множество всех классов системы.

Имеется также некоторый объект $X_s = \{x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sn}\}$, заданный только набором признаков (для единообразия присвоим ему вес равный единице, т.е. $p_s = 1$, тогда $X_s^W = \{x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sn}, p_s\}$).

Необходимо выполнить классификацию объекта X_s^W на основе функции конкурентного сходства в конкурирующей взвешенной среде.

Функция взвешенного конкурирующего сходства. Для оценки близости между парой w -объектов X_i^W и X_j^W взвешенной обучающей выборки X^W в работе [9] была введена метрика

$$d_W(X_i^W, X_j^W) = \frac{R(X_i^W, X_j^W)}{p_i \cdot p_j} = \frac{\sqrt{\sum_{o=1}^n (x_{io} - x_{jo})^2}}{p_i \cdot p_j}, \quad (2)$$

и показано, что она обеспечивает корректную классификацию по взвешенной выборке w -объектов.

Можно показать, что данная метрика в отличие от FRiS-функции [10] удовлетворяет аксиомам тождества и симметричности, и, также как (1), не для всех значений признаков и весов w -объектов удовлетворяет аксиоме треугольника.

Результаты работы [9] и предыдущие рассуждения показывают, что (2) является метрикой во взвешенном пространстве признаков, поэтому выполним далее естественную замену метрики $R(X_a, X_b)$ в (1) на метрику (2) для построения функции конкурентного сходства на основе взвешенных обучающих выборок w -объектов.

Поскольку в (1) требуется определять расстояние между классифицируемым объектом X_s , вес которого $p_s = 1$ и некоторым w -объектом X_a^W , имеющим вес p_a , преобразуем (2) к следующему виду:

$$d_w(X_a^W, X_s) = \frac{R(X_a^W, X_s)}{p_a}. \quad (3)$$

Тогда функция конкурентного сходства на основе взвешенных обучающих выборок w -объектов будет иметь вид:

$$F_{\frac{X_1^W}{X_2^W}}(X_s) = \frac{\frac{R(X_2^W, X_s)}{p_2} - \frac{R(X_1^W, X_s)}{p_1}}{\frac{R(X_2^W, X_s)}{p_2} + \frac{R(X_1^W, X_s)}{p_1}}.$$

На основе проведенных рассуждений и выполненных преобразований получим функцию взвешенного конкурентного сходства (wFRiS-функцию) классифицируемого объекта X_s с ближайшим w -объектом X_1^W первого класса в сравнении с ближайшим w -объектом X_2^W второго класса:

$$F_{\frac{X_1^W}{X_2^W}}(X_s) = \frac{p_1 \cdot R(X_2^W, X_s) - p_2 \cdot R(X_1^W, X_s)}{p_1 \cdot R(X_2^W, X_s) + p_2 \cdot R(X_1^W, X_s)}. \quad (4)$$

Аналогично можно показать, что функция взвешенного конкурентного сходства (wFRiS-функцию) для классификации некоторого

w -объекта X_q^W с ближайшим w -объектом X_1^W первого класса в сравнении с ближайшим w -объектом X_2^W второго класса будет иметь вид:

$$F_{X_1^W / X_2^W} (X_q^W) = \frac{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) - p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)}{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) + p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)}. \quad (5)$$

Анализируя (5), сформулируем следующие свойства wFRiS-функций, основанные на свойствах, приведенных в [3, 10].

Свойство 1. Результат классификации w -объекта X_q^W не зависит от веса p_q этого взвешенного объекта. Таким образом, подтверждается принцип относительности классификации, являющийся основой функции конкурирующего сходства, поскольку результат классификации в конкурирующей взвешенной среде зависит от взаимного расположения w -объектов и весов только конкурирующих w -объектов.

Свойство 2. Функция взвешенного конкурентного сходства принимает значения из диапазона $[-1; 1]$, т.е. $F_{X_1^W / X_2^W} (X_q^W) \in [-1; 1]$.

Покажем, что

$$\frac{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) - p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)}{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) + p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)} \geq -1$$

или

$$p_1 R(X_2^W, X_q^W) - p_2 R(X_1^W, X_q^W) \geq -p_1 R(X_2^W, X_q^W) - p_2 R(X_1^W, X_q^W).$$

В результате получим $2p_1 R(X_2^W, X_q^W) \geq 0$, что верно для любых X_q^W и X_2^W согласно постановке задачи.

Аналогично можно показать, что

$$\frac{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) - p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)}{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) + p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)} \leq 1$$

или в результате преобразований: $-2p_2 R(X_1^W, X_q^W) \leq 1$ для любых X_q^W и X_1^W .

Свойство 3. Если оценивается мера сходства w -объекта X_q^W с ближайшим w -объектом X_1^W первого класса в сравнении с ближайшим w -объектом X_2^W второго класса, то справедливо следующее:

$$F_{X_1^W / X_2^W} (X_q^W) = \begin{cases} +1, & \text{если } X_q^W = X_1^W; \\ -1, & \text{если } X_q^W = X_2^W; \\ (-1; 1), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Покажем, что при $X_q^W = X_1^W$ мера $F_{X_1^W / X_2^W} (X_q^W) = 1$. Заменяем в (5)

X_1^W на X_q^W и, учитывая что $R(X_q^W, X_q^W) = 0$, получим

$$\frac{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) - p_2 \cdot R(X_q^W, X_q^W)}{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W) + p_2 \cdot R(X_q^W, X_q^W)} = \frac{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W)}{p_1 \cdot R(X_2^W, X_q^W)} = 1.$$

Аналогично покажем, что при $X_q^W = X_2^W$ мера $F_{X_1^W / X_2^W} (X_q^W) = -1$.

Заменяем в (5) X_2^W на X_q^W и получим

$$\frac{p_1 \cdot R(X_q^W, X_q^W) - p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)}{p_1 \cdot R(X_q^W, X_q^W) + p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)} = \frac{-p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)}{p_2 \cdot R(X_1^W, X_q^W)} = -1.$$

Отметим, что данное свойство выполняется только при условии, что объекты равны по всем значениям признаков и весу.

Классификация объектов методом ближайшего соседа на основе функции взвешенного конкурирующего сходства. Одним из наименее трудоемких, но достаточно эффективных алгоритмов классификации объектов по обучающей выборке является метод k -ближайших соседей (k NN-классификатор) [2]. Его основу составляет поиск класса, k ближайших по выбранной метрике объектов которого располагаются на минимальном суммарном расстоянии к классифицируемому объекту. В простейшем случае классификация осуществляется по одному ближайшему объекту, а в качестве метрики может быть использована FRiS-функция [10]. Соответственно, для классификации по взвешенной

обучающей выборке оценка близости w -объектов может быть выполнена на основе wFRiS-функции (4).

Для существенно пересекающихся в пространстве признаков классов классификация может также проводиться по k ближайшим w -объектам каждого из классов. Отметим, что если w -объекты были построены путем объединения множества близкорасположенных объектов исходной выборки [6, 7], то классификация по одному ближайшему w -объекту фактически равноценна классификации по k ближайшим объектам исходной выборки.

Для оценки эффективности предложенного подхода был проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве исходных данных были использованы наборы данных репозитория UCI. В качестве критерия эффективности классификации использовалась процедура скользящего контроля. Результаты тестирования показали, что ошибка классификации по выборке w -объектов на основе wFRiS-функции уменьшилась в среднем на 4,3% по сравнению с классификацией по исходной выборке с использованием FRiS-функции. Для некоторых наборов данных ошибка составила не более 1,5%, что совпадает с лучшими опубликованными результатами, а в некоторых случаях и превосходит их.

Выводы. В работе предложено естественное расширение области использования функции конкурентного сходства на взвешенные выборки w -объектов (wFRiS-функции), что позволяет с высокой эффективностью и минимальными затратами решать задачу классификации объектов в адаптивных системах распознавания.

Автор благодарит д.т.н., проф. Н.Г. Загоруйко за постоянный интерес и поддержку исследований автора по данной тематике.

Список литературы: 1. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа знаний и данных / *Н.Г. Загоруйко*. – Новосибирск: Издательство института математики, 1999. – 270 с. 2. *Theodoridis S.* Pattern Recognition / *S.Theodoridis, K. Koutroubas*. – San Diego: Academic Press, 2008. – 823 p. 3. *Загоруйко Н.Г.* Количественная мера компактности и сходства в конкурентном пространстве / *Н.Г. Загоруйко, И.А. Борисова, В.В. Дюбанов, О.А. Кутненко*. // Сиб. журн. индустр. матем. – 2010. – № 13. – С. 59–71. 4. *Zagoruiko N.G.* Methods of Recognition Based on the Function of Rival Similarity / *N.G. Zagoruiko, I.A. Borisova, V.V. Dyubanov, O.A. Kutnenko* // Pattern Recognition and Image Analysis // 2008. – Vol. 18. – № 1. – P. 1–6. 5. *Pal S.K.* Pattern Recognition Algorithms for Data Mining: Scalability, Knowledge Discovery and Soft Granular Computing / *S.K. Pal, P. Mitra*. – Chapman and Hall/CRC, 2004. – 280 p. 6. *Волченко Е.В.* Метод построения взвешенных обучающих выборок в открытых системах распознавания / *Е.В. Волченко* // Доклады 14-й Всероссийской конференции "Математические методы распознавания образов (ММРО-14)", Суздаль, 2009. – М.: Макс-Пресс, 2009. – С. 100–104. 7. *Волченко Е.В.* Сеточный подход к построению взвешенных обучающих выборок w -объектов в адаптивных системах распознавания / *Е.В. Волченко* // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика і

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – № 36. – С. 12 – 22. **8. Волченко Е.В.** Построение обучающей выборки w -объектов на основе коллективного решения группы экспертов / *Е.В. Волченко // Штучний інтелект.* – 2011. – № 1. – С. 147–153. . **9. Волченко О.В.** Оцінка близькості об'єктів у адаптивних системах розпізнавання, що навчаються / *О.В. Волченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції.* – Харків, НТУ "ХПІ", 2012. – Ч. IV. – С. 8. **10. Загоруйко Н.Г.** Меры сходства, компактности, информативности и однородности обучающей выборки / *Н.Г. Загоруйко, И.А. Борисова, В.В. Дюбанов, О.А. Кутненок. // Труды Всероссийской Конференции "Знания-Онтологии-Теории" (ЗОНТ-09), Новосибирск, 2009. – Том I. – С. 93–102.*

Статью представил д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой системного анализа и моделирования Института информатики и искусственного интеллекта ГВУЗ "ДонНТУ" А.С. Миненко

УДК 004.93.11

Класифікація об'єктів у адаптивних системах розпізнавання на основі функції зваженої конкурентної подібності / Волченко О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 18 – 25.

У роботі запропоновано природне розширення області використання функції конкурентної подібності на зважені навчаючі вибірки w -об'єктів у адаптивних системах розпізнавання. Описано принцип класифікації об'єктів методом k -найближчих сусідів на основі функції зваженої конкурентної подібності ($wFRIS$ -функції). Наведено результати експериментальних досліджень, що підтвердили ефективність запропонованого підходу. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: адаптивна система розпізнавання, w -об'єкт, функція зваженої конкурентної подібності, метод k -найближчих сусідів.

UDC 004.93.11

Objects classification based on the function of rival similarity in adaptive recognition systems / Volchenko E.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 18 – 25.

Author proposed the extension of the function of rival similarity that is used for weighted training samples of w -objects in adaptive recognition systems. Algorithm of k -nearest neighbors expansion was described in the article, which is based on the function of rival similarity for weighed samples of w -objects. Experimental results were confirmed the efficiency of the offered approach. Refs.: 10 titles.

Keywords: adaptive recognition system, w -object, k -nearest neighbors, the function of rival similarity metric.

Поступила в редакцію 06.08.2012

Х.М. ГАМЗАЕВ, канд. техн. наук, доц., Азербайджанская государственная нефтяная академия, Баку, Азербайджан

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОВОДОНАПОРНОГО РЕЖИМА ПЛАСТА

Для описания упруговодонапорного режима разработки пласта предлагается модель типа Стефана, которая характеризуется наличием неизвестной границы раздела жидкостей. Условие на границе раздела считается неизвестным и взамен этого задается дополнительное условие на фиксированной границе пласта. Для численного решения поставленной задачи предложен вычислительный алгоритм на основе методов выпрямления фронтов и разностной аппроксимации. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: упруговодонапорный режим, пласт, метод выпрямления фронтов, разностная аппроксимация.

Постановка задачи. Известно, что большинство нефтяных месторождений приурочено к водоносным пластам и разрабатывается в условиях упруговодонапорного режима. При проявлении этого режима движение нефти к скважинам происходит не только за счет потенциальной энергии упругой деформации пласта и нефти, а также в силу давления краевой воды [1]. В большинстве случаев вытеснение нефти краевой водой происходит полностью и в пласте образуется четкая граница раздела двух жидкостей, движущаяся по неизвестному заранее закону.

Предположим, что рассматривается недеформируемый, однородный горизонтально расположенный нефтеносный пласт протяженностью L , постоянной толщины и ширины. В сечении пласта $x = 0$ расположена галерея эксплуатационных скважин, а внешняя граница пласта окружена краевой водой, находящейся под давлением $p_s(t)$. Пусть в момент времени $t = 0$ впускается в эксплуатацию галерея эксплуатационных скважин и в пласте возникает упруговодонапорный режим. За счет потенциальной энергии упругой деформации нефти и за счет давления краевой воды происходит прямолинейно-параллельное течение нефти к скважинам. По мере отбора нефти через галерею краевая вода поступает в пласт, полностью замещая поры занятые нефтью, и образуется четкая граница раздела вода–нефть. Предполагается, что нефть является слабосжимаемой жидкостью и ее движения в пласте подчиняются закону Дарси. Тогда уравнение, описывающее нестационарное прямолинейно-параллельное течение нефти в пласте с учетом активного продвижения краевой воды можно представить в следующем виде

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (x, t) \in \Omega_s = \{0 < x < s(t), \quad 0 < t \leq T\}, \quad (1)$$

где $P(x, t)$ – давление в пласте; $\chi = \frac{k}{\mu\beta m}$; k – абсолютная проницаемость пласта; μ – вязкость нефти; β – коэффициент объемного сжатия нефти; m – коэффициент пористости пласта; $s(t)$ – положение границы раздела вода–нефть.

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ распределение давления в нефтеносном пласте и положение границы раздела жидкостей известны, т.е. для уравнения (1) имеем следующие начальные условия

$$s(0) = L, \quad (2)$$

$$P|_{t=0} = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq s(0). \quad (3)$$

Предположим, что изменение давления во времени на галерее эксплуатационных скважин описывается функцией $f(t)$. Тогда на границе пласта $x = 0$ будем иметь следующее условие

$$P|_{x=0} = f(t). \quad (4)$$

На границе раздела вода–нефть $x = s(t)$ давление нефти должно быть равно давлению краевой воды

$$P|_{x=s(t)} = p_s(t), \quad (5)$$

и должно быть выполнено условие материального баланса

$$m \frac{ds}{dt} = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=s(t)}. \quad (6)$$

Следует отметить, что прямая задача упруговодонапорного режима пласта, состоящая в нахождении функций $P(x, t)$, $s(t)$, удовлетворяющих уравнениям (1), (6) и заданным условиям (2) – (5), относится к задаче типа Стефана [2, 3].

Однако необходимо отметить, что в упруговодонапорном режиме пласта давление краевой воды не доступно для непосредственного измерения. Следовательно, функция $p_s(t)$ неизвестна и также подлежит определению. Очевидно, что для корректной постановки задачи необходимо задавать дополнительное условие. Пусть дополнительное условие задается на границе пласта $x = 0$

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t). \quad (7)$$

Таким образом, требуется определить функции $P(x, t), s(t), p_s(t)$ из уравнения (1), (6) и условий (2) – (5), (7). Задачу (1) – (7) можно отнести к классу граничных обратных задач [4, 5]. Существенной особенностью данной задачи является наличие подвижной границы раздела жидкостей, закон перемещения которого определяется в ходе решения задачи. Однако граничные обратные задачи для Стефановской модели типа (1) – (7) мало исследованы [6, 7].

Метод решения. Используя метод выпрямления фронтов, преобразуем задачу (1) – (7). Путем замены переменных

$$y = \frac{x}{s(t)}, \quad t = t, \quad P(x, t) = P(y, t),$$

область задания уравнения (1) Ω_s отобразим на область $\Omega = \{0 < y < 1, 0 < t \leq T\}$.

Тогда уравнения (1), (6) и условия (2) – (5), (7) принимают вид

$$s^2(t) \frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + ys(t) \frac{ds}{dt} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (y, t) \in \Omega = \{0 < y < 1, 0 < t \leq T\},$$

$$s(t) \frac{ds}{dt} = -\chi\beta \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_{y=1}, \quad (8)$$

$$P|_{t=0} = \varphi(y), \quad 0 \leq y \leq 1, \quad (9)$$

$$s(0) = L, \quad (10)$$

$$P|_{y=0} = f(t), \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_{y=0} = \mu s(t) q(t) / k, \quad (12)$$

$$P|_{y=1} = p_s(t). \quad (13)$$

Для перехода к разностной задаче введем равномерную разностную сетку в области $\bar{\Omega}: \bar{\omega}_{h\tau} = \{(y_i, t_j): y_i = ih, t_j = j\tau, h = L/N, \tau = T/M, i = 0, 1, 2, \dots, N, j = 0, 1, 2, \dots, M\}$. Подставляя (8) в уравнение (7), разностные аналоги уравнений (7), (8) на сетке $\bar{\omega}_{h\tau}$ запишем в виде

$$s^{2j} \frac{P_i^{j+1} - P_i^j}{\tau} = \chi \frac{P_{i+1}^{j+1} - 2P_i^{j+1} + P_{i-1}^{j+1}}{h^2} - \chi\beta y_i \frac{P_N^j - P_{N-1}^j}{h} \frac{P_i^{j+1} - P_{i-1}^{j+1}}{h},$$

$$\frac{s^{2j+1} - s^{2j}}{\tau} = -2\chi\beta \frac{P_N^{j+1} - P_{N-1}^{j+1}}{h},$$

$$i = \overline{1, N-1}, j = \overline{0, M-1}.$$

Полученную систему разностных уравнений преобразуем к виду

$$a_i P_{i-1}^{j+1} - c_i P_i^{j+1} + b_i P_{i+1}^{j+1} = -d_i, i = \overline{1, N-1}, j = \overline{0, M-1}, \quad (14)$$

$$s^{2j+1} = s^{2j} - 2\tau\chi\beta \frac{P_N^{j+1} - P_{N-1}^{j+1}}{h}, \quad (15)$$

где $a_i = \chi + \chi\beta y_i (P_N^j - P_{N-1}^j)$; $b_i = \chi$; $c_i = a_i + b_i + s^{2j} h^2 / \tau$; $d_i = s^{2j} P_i^j h^2 / \tau$.

К уравнениям (14), (15) добавим разностные аналоги начальных и граничных условий (9) – (13):

$$P_i^0 = \varphi_i, \quad (16)$$

$$P_0^{j+1} = f^{j+1}, \quad (17)$$

$$P_0^{j+1} = P_1^{j+1} - h\mu q^j s^j / k, \quad (18)$$

$$P_N^{j+1} = p_s^{j+1}, \quad (19)$$

$$s^0 = L. \quad (20)$$

Для решения системы разностных уравнений (14), (16) – (19) используем подход, предложенный в [8]. Решение этой системы представляется в виде

$$P_i^{j+1} = \alpha_{i+1} P_{i+1}^{j+1} + \beta_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (21)$$

где $\alpha_{i+1} = b_i / (c_i - \alpha_i a_i)$, $\beta_{i+1} = (a_i \beta_i + d_i) / (c_i - \alpha_i a_i)$, $i = 1, 2, \dots, N-1$,
 $\alpha_1 = 1$, $\beta_1 = -h\mu q^j s^j / k$.

Для определения зависимости между P_N^{j+1} и P_0^{j+1} в явном виде соотношение (21) запишется при $i = 0$

$$P_0^{j+1} = \alpha_1 P_1^{j+1} + \beta_1.$$

Подставив сюда выражение для P_1^{j+1} , т.е. $P_1^{j+1} = \alpha_2 P_2^{j+1} + \beta_2$, будем иметь

$$P_0^{j+1} = \alpha_1 \alpha_2 P_2^{j+1} + \alpha_1 \beta_2 + \beta_1.$$

Далее, подставляя в последнее уравнение выражения для $P_2^{j+1}, P_3^{j+1}, \dots, P_{N-1}^{j+1}$, получим формулу, в которой P_0^{j+1} выражается через P_N^{j+1}

$$P_0^{j+1} = P_N^{j+1} \prod_{i=1}^N \alpha_i + \sum_{i=2}^N \beta_i \prod_{n=1}^{i-1} \alpha_n + \beta_1.$$

Отсюда, учитывая (17), (19), получим

$$p_s^{j+1} = \frac{f^{j+1} - \sum_{i=1}^N \beta_i \prod_{n=1}^{i-1} \alpha_n - \beta_1}{\prod_{i=1}^N \alpha_i}. \quad (22)$$

Определив p_s^{j+1} по формуле (22), можно последовательно найти $P_{N-1}^{j+1}, P_{N-2}^{j+1}, \dots, P_1^{j+1}$ по рекуррентной формуле (21). А положение границы раздела жидкостей можно определить как положительный корень уравнения (15). При переходе на следующий временной слой описанная процедура вычислений снова повторяется.

Таким образом, предложенный численный метод позволяет в каждом временном слое определить распределение давления в нефтеносном пласте и положение подвижной границы.

Результаты численных расчетов. Для выяснения эффективности предложенного вычислительного алгоритма были проведены численные эксперименты по следующей схеме: для заданных функций $q(t), s(t)$ решалась прямая задача (7) – (9), (12). Найденная зависимость $f(t) = P(0, t)$ принималась за точные данные для численного решения обратной задачи по восстановлению $p_s(t)$. Первая серия расчетов выполнялась с использованием этих невозмущенных данных. Вторая серия расчетов проводилась при наложении на $f(t)$ некоторой функции, моделирующей погрешность экспериментальных данных $\tilde{f}(t) = f(t) + \delta(\sigma(t) - 0.5)$, где $\sigma(t)$ – случайный процесс, моделируемый с помощью датчика случайных чисел, δ – уровень погрешности.

Расчеты выполнялись на пространственно-временной разностной сетке с шагами $h = 0.04$, $\tau = 2$ сут. Результаты численного эксперимента, проведенного для случая $\beta = 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$, $k = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $\mu = 0.003 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $L = 200 \text{ м}$, $s(t) = L - 2\sqrt{t}$, $m = 0.3$, $\varphi(x) = 200 \text{ атм.}$, при использовании невозмущенных и возмущенных входных данных представлены в таблице; в ней t – время; p_s^t – точные значения функции $p_s(t)$; $\overline{p_s}$ – вычисленные значения $p_s(t)$ при невозмущенных данных; $\tilde{p_s}$ – вычисленные значения $p_s(t)$ при возмущенных данных. Для возмущения входных данных использовалась погрешность уровня $\delta = 5 \text{ атм.}$

Результаты численного эксперимента

t , сут.	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P_s^t	215.97	220.51	222.11	222.09	221.00	219.13	216.65	213.67	210.29
$\overline{P_s}$	215.97	220.51	222.11	222.09	221.00	219.13	216.65	213.67	210.29
\tilde{P}_s	214.94	220.20	219.16	220.82	219.20	217.53	218.46	210.58	211.26

Как показывают результаты численного эксперимента, при использовании невозмущенных входных данных искомая функция $p_s(t)$ восстанавливается точно. При использовании возмущенных входных данных, в которых погрешность имеет флуктуационный характер, искомая функция $p_s(t)$ восстанавливается с относительной погрешностью приблизительно в 2%. При уменьшении уровня погрешности решение восстанавливается более точно.

Выводы. Предложена математическая модель упруговодонапорного режима разработки пласта и алгоритм ее численного решения.

Список литературы: 1. *Басниев К.С.* Нефтегазовая гидромеханика / *К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг.* – М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 544 с. 2. *Рубинштейн Л.И.* Проблема Стефана / *Л.И. Рубинштейн.* – Рига, Звайгзне, 1967. – 232 с. 3. *Самарский А.А.* Вычислительная теплопередача / *А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич.* – М.: Едиториал, 2003. – 784 с. 4. *Самарский А.А.* Численные методы решения обратных задач математической физики / *А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич.* – М.: Издательство ЛКИ, 2009. – 480 с. 5. *Алифанов О.М.* Экстремальные методы решения некорректных задач / *О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, С.В. Румянцев.* – М.: Наука, 1988. – 288 с. 6. *Гольдман Н.Л.* Классическое и обобщенное решение двухфазной граничной обратной задачи Стефана / *Н.Л. Гольдман* // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – № 3. – С. 133–143. 7. *Лобанова В.В.* Решение одной обратной задачи Стефана с линейной подвижной границей / *В.В. Лобанова* // Математический журнал. Алматы. – 2006. – № 2. – С. 76–80. 8. *Гамзаев Х.М.* Численное решение некорректной задачи однофазного течения в двумерном пласте / *Х.М. Гамзаев* // Проблемы управления и информатики. – Киев. – 2008. – № 5. – С. 74–84.

Статью представил д.т.н., проф., зав. кафедрой систем информации НТУ "ХПИ" А.А. Серков.

УДК 532.546:519.63

Чисельне моделювання пруговодонапірного режиму пласта / Гамзаєв Х.М.
// Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 26 – 32.

Для опису пруговодонапірного режиму розробки пласта пропонується модель типу Стефана, яка характеризується наявністю невідомого кордону розділу рідин. Умова на межі розділу вважається невідомою і замість цього задається додаткова умова на фіксованому кордоні пласта. Для чисельного розв'язання поставленої задачі запропонований обчислювальний алгоритм на основі методів випрямлення фронтів і різницевої апроксимації. Табл. 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: пруговодонапірний режим, пласт, метод випрямлення фронтів, різницево апроксимація.

UDC 532.546:519.63

Numerical modeling of elastic water drive mode of layer / Gamzaev Kh.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 26 – 32.

For the description of water drive development mode of the reservoir proposed model of the type of Stephen, which is characterized by the presence of unknown border of section of liquids. The condition on the boundary is considered to be unknown, and instead set additional condition on the fixed boundary layer. For the numerical solution of the set task proposed numerical algorithm based on the methods of rectification of the fronts and difference approximation. Tabl.: 1. Refs.: 8 titles.

Keywords: elastic water drive mode, the layer, the method of straightening fronts, difference approximation.

Н.А. ГОЛОВКО, аспирант, ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова",
Магнитогорск,

О.С. ЛОГУНОВА, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО "МГТУ
им. Г.И. Носова", Магнитогорск

ОЦЕНКА АРХИТЕКТУРЫ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА АГРЕГАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ

В работе приведены результаты построения имитационной модели, описывающей процесс нагрева стальной полосы в отделении нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования (АНГЦ). Для построения модели использована технология искусственных нейронных систем. Предложенная модель позволит учесть многозонную структуру агрегата и сложные нелинейные зависимости между параметрами зоны. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: агрегат непрерывного горячего цинкования, процесс нагрева, искусственная нейронная сеть, имитационная модель.

Анализ литературы и постановка проблемы. За последние 10 лет отмечено снижение срока службы стальных изделий во всех сферах применения, обусловленное повышенной коррозионной активностью сред, в которых они эксплуатируются. Процесс горячего цинкования приводит к расширению области применения металлических изделий в активных средах. По этой причине наблюдается увеличение спроса на оцинкованные изделия до 7 млн. т в год. В условиях ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" (ОАО "ММК") процесс цинкования осуществляется на агрегатах непрерывного горячего цинкования (АНГЦ).

В основе процесса горячего оцинкования лежит принцип распределенной во времени и пространстве термической обработки изделий. Качество получаемой продукции и эффективность технологических процессов определяются стабильностью поддержания параметров нагрева изделия: скорость протягивания полосы и температурный режим в зонах. Для решения задач выбора и поддержания рационального режима работы АНГЦ требуется создание математической модели, способной адекватно в реальном времени описывать протекающие в печи и на агрегате динамические процессы. Так как многозонные печи являются тепловыми объектами с распределенными параметрами, то модель динамики должна отражать изменение температуры во времени в каждой точке печи.

Частным случаям создания математических моделей посвящено множество работ: Аптермана В.Н., Еринова А.Е., Иванова И.А., Гельмана Г.А., Лисовского С.И. [1 – 5]. Так в работе Г.А. Гельмана [4] изложена методика построения математической модели тепловой работы протяжной печи. В основу модели положены уравнения теплового баланса зон камеры нагрева. Предложенная модель лишена свойств адаптации для учёта и компенсации возмущений. Подробный анализ модели, приведенной в [5, 6], показывает, что недостаточная изученность процесса теплопереноса движущихся тел, сложность получающихся систем дифференциальных уравнений и систем эмпирических взаимосвязанных уравнений, имеющих высокую размерность, вынуждает исследователя прибегать к абстрагированию и упрощать математическую формулировку задачи [5], теряя конструктивные особенности агрегатов. В связи с этим до настоящего времени остаются актуальными следующие проблемы:

- существующее математическое описание процесса не учитывает многозонную конструкцию построения агрегатов;
- настройка и регулирование процесса отжига на агрегате производится оператором на основании субъективных знаний технологов о протекании процесса оцинкования полосы.

Указанные проблемы определили цель научного исследования.

Цель научного исследования – уменьшение доли некондиционной продукции горячего цинкования в условиях энергосберегающего режима протекания процесса термохимического отжига за счет создания для системы управления имитационной модели, описывающей процесс нагрева полосы и учитывающей зональную конструкцию АНГЦ на основе системы искусственных нейронных сетей.

Описание структура агрегата АНГЦ и задач моделирования. Агрегат цинкования, функционирующий в условиях ОАО "ММК", имеет многозонную структуру (рис. 1). Для учета сложной структуры агрегата предлагается использовать математическое описание, основанное на ИНС, которое позволяет осуществить многопараметрический прогноз, выполнять оперативное прогнозирование в течение 5 минут (при полном времени цикла 30 – 40 минут), решать слабо формализованные задачи, выполнять дообучение, самоадаптацию, обобщение на основе ранее полученных знаний и учитывать температурную историю предыдущих зон.

Сравнительный анализ нейросетевых архитектур показал, что целесообразно в решении поставленной задачи использовать полносвязную нейронную сеть прямого распространения – *Multi Layer*

Perceptron (MLP). Предложено каждый из участков протяжной печи представить в виде отдельно взятой нейронной сети. На вход каждой из ИНС подаются средние значения технологических параметров в зоне за N отрезков времени, на выходе сети снимается прогноз по температуре.

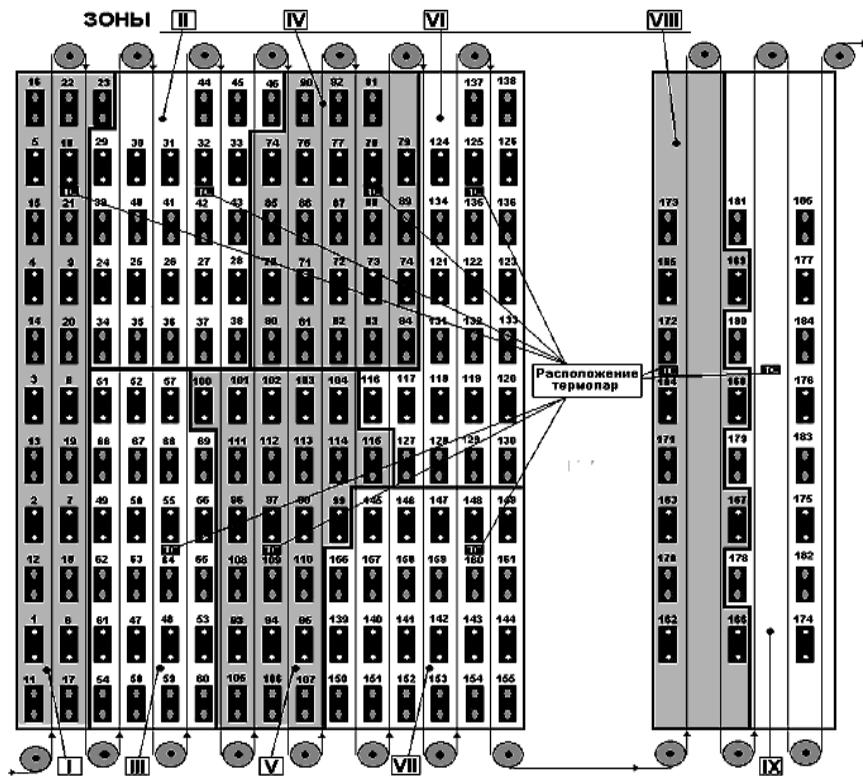


Рис. 1. Схема расположения технологических зон отжига полосы и термопар по металлургической длине АНГЦ

Разработка и практическая реализация нейросетевой модели.

Для обучения модели на основе промышленных данных за два года после обработки была получена равномерная выборка данных за 227 дней. В итоге была получена обучающая выборка из 32768 наборов. Для целей обучения и тестирования данная выборка была разделена на две части по 16384 набора в каждой.

Эмпирическим путем было выявлено, что целесообразно использовать для нейросетевой модели входной вектор размерностью 20

элементов – 7 средних температур за 10 и 20 мин, средние скорости за 5, 10, 15 мин и средняя толщина и ширина за 15 мин, и марка стали.

Для определения оптимальной внутренней структуры ИНС был применен алгоритм *Optimal Brain Damage (OBD)* редукции сети, где в качестве меры значимости веса используется показатель асимметрии, определяемый выражением:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial w_{ij}^2} w_{ij}^2, \quad (1)$$

где S_{ij} – показатель асимметрии веса нейрона с номером i в слое j ; E – целевая функция (функция погрешности), к минимизации которой стремится тот или иной алгоритм обучения; w_{ij} – значение веса.

В соответствии с данной методикой синтезируется искусственная нейронная сеть с заведомо излишним числом нейронов в скрытых слоях, затем размерность слоев понижается путем отбрасывания нейронов с наименьшими показателями асимметрии.

На основании редукции были получены принципиально две архитектуры сетей – 20-26-1 (20 нейронов во входном слое, 26 – нейронов в скрытом слое и 1 – в выходном слое) и 20-32-8-1 (20 нейронов во входном слое, 32 – в первом скрытом слое, 8 – во втором скрытом слое и 1 – в выходном слое).

Синтезированные сети обучались методом модифицированного обратного распространения ошибки – *RPROP (resilient backpropagation)*, основанном на поведении градиентов целевой функции ошибки обучения сети. Приращение для каждого веса вычисляется индивидуально на каждом шаге итерации по (2) в соответствии с убыванием градиента целевой функции ошибки обучения сети:

$$\Delta_{ij}^t = \begin{cases} \min(\Delta_{ij}^t \times S^+, \Delta_{\max}), & \text{если } \frac{\partial \varepsilon^{t-1}}{\partial w_{ij}} \times \frac{\partial \varepsilon^t}{\partial w_{ij}} > 0; \\ \max(\Delta_{ij}^t \times S^-, \Delta_{\min}), & \text{если } \frac{\partial \varepsilon^{t-1}}{\partial w_{ij}} \times \frac{\partial \varepsilon^t}{\partial w_{ij}} < 0; \\ \Delta_{ij}^t, & \text{если } \frac{\partial \varepsilon^{t-1}}{\partial w_{ij}} \times \frac{\partial \varepsilon^t}{\partial w_{ij}} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где Δ_{ij}^t – величина приращения веса для нейрона с номером i в слое j ; S^- – усиливающий фактор $0 < S^- (= 0,5) < 1 < S^+ (= 1, 2)$, $\partial \varepsilon^{t-1}$ – приращение

ошибки обучения на предыдущем шаге, $\partial \varepsilon^t$ – приращение ошибки обучения на текущем шаге, ∂w_{ij} – приращение веса нейрона i в слое j .

Величина приращения усиливается фактором, когда алгоритм сходится к минимуму и производная не меняет знак. Это ускоряет процесс на плоских участках и замедляет в случае пропуска локального минимума. Значение весов модифицируется в соответствии с направлением убывания градиента по (3):

$$\Delta w_{ij}^t = \begin{cases} \Delta_{ij}^t \times \text{sign} \left[\frac{\partial \varepsilon^t}{\partial w_{ij}} \right] \times \eta \times o_i, & \text{если } \frac{\partial \varepsilon^t}{\partial w_{ij}} \times \frac{\partial \varepsilon^{t-1}}{\partial w_{ij}} \geq 0; \\ -\Delta_{ij}^t \times \eta \times o_i, & \text{если } \frac{\partial \varepsilon^t}{\partial w_{ij}} \times \frac{\partial \varepsilon^{t-1}}{\partial w_{ij}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где η – параметр, определяющий скорость обучения; o_i – значение на выходе i -го нейрона.

Если производная ошибки изменяет знак, то происходит возврат к предыдущему значению веса. Результаты обучения представлены на рис. 2, 3 и в табл. Анализ результатов показал высокое качество получаемого прогноза и соответствие опытных данных и данных с модели ИНС участка нагрева. Значения коэффициентов корреляции являются значимыми на 5 % уровне по критерию Стьюдента.

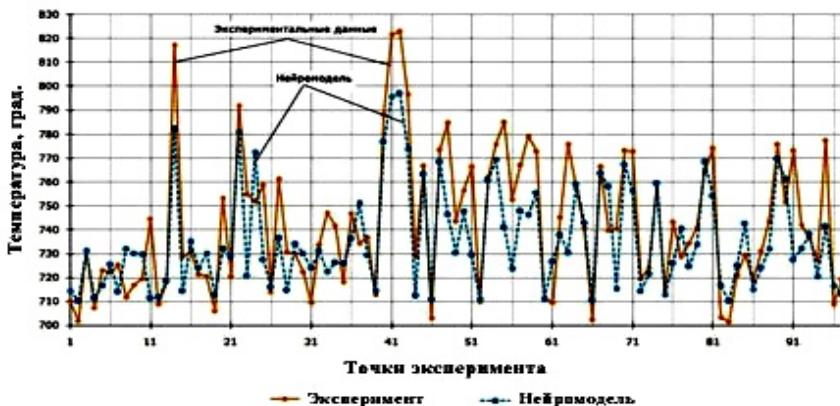


Рис. 2. Результаты обучения нейросетевой модели 20–26–1

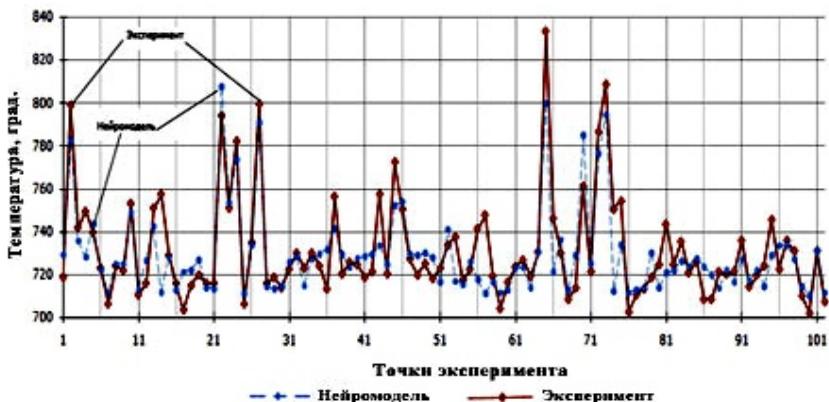


Рис. 3. Результаты обучения нейросетевой модели 20-32-8-1

Таблица

Оценка результатов обучения нейронных сетей 20-26-1 и 20-32-8-1

Эпохи	Показатели	Архитектура сти	
		20-26-1	20-32-8-1
5000	Средняя квадратическая ошибка, °С	20,38	21,44
	Коэффициент корреляции	0,89	0,82
	Средняя относительная ошибка аппроксимации, %	2,03	2,15
6000	Средняя квадратическая ошибка, °С	20,04	20,56
	Коэффициент корреляции	0,90	0,88
	Средняя относительная ошибка аппроксимации, %	2	2,06
7000	Средняя квадратическая ошибка, °С	20,47	20,98
	Коэффициент корреляции	0,90	0,89
	Средняя относительная ошибка аппроксимации, %	2,05	2,1

Выводы. Таким образом, полученные характеристики нейронных сетей позволили определить рациональную архитектуру нейросетевой модели протяжной печи, достаточную для описания процесса нагрева стальной полосы с учетом многозонной структуры агрегата и наличия многосвязных зависимостей и имеющую наибольшее быстродействие при прогнозировании температуры на выходе участка нагрева протяжной печи агрегата непрерывного горячего цинкования.

Список литературы: 1. Антерман В.Н. Протяжные печи / В.Н.Антерман, В.М. Тымчак. – М.: Металлургия, 2000. – 320 с. 2. Еринов А.Е. Промышленные печи с радиационными трубами / А.Е. Еринов, А.М. Семернин. – М.: Металлургия, 2001. – 280 с. 3. Гельман Г.А. Автоматизация тепловых режимов протяжных печей / Г.А. Гельман. – М.: Металлургия, 2000. – 112 с. 4. Иванов И.А. Регулирование тепловых металлургических процессов

/ И.А Иванов, С.И. Лисовский. – М.: Металлургия, 2001. – 300 с. 5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Пер. с англ. / С. Хайкин. – М.: ООО И.Д. Вильямс, 2006. – 1104 с. 6. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. – М.: Мир, 2002. – 150 с. 7. Логовский А.С. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач управления динамическими объектами / А.С. Логовский. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 350 с. 8. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2002. – 382 с.

УДК 004.896

Оцінка архітектури штучних нейронних мереж для моделювання процесу нагріву сталевий смуги на агрегати безперервного гарячого цинкування / Головко Н.А., Логунова О.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 33 – 39.

В роботі наведені результати побудови імітаційної моделі, яка описує процес нагріву сталевий смуги у відділенні нагріву агрегату безперервного гарячого цинкування. Для побудови моделі використана технологія, що заснована на використанні штучних нейронних мереж. Запропонована модель дозволить врахувати багатозонну структуру агрегату і складні нелінійні залежності між параметрами зони. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключові слова: агрегат безперервного гарячого цинкування, процес нагріву, штучна нейронна мережа, імітаційна модель.

UDC 004.896

Evaluation of artificial neural net architecture characteristics for the purpose of modeling the process of steel strip heating during continuous hot galvanizing / Golovko N.A., Logunova O.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 33 – 39.

Article presents the results of a simulation model describing the process of steel strip heating on the heating department of continuous hot-dip galvanizing. The model is based on the principle of artificial neural systems. The proposed model will take into account the multiband structure of the unit and the complex nonlinear relationship between the parameters of the zone. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 8 titles.

Keywords: department of continuous hot-dip galvanizing, process of steel strip heating, an artificial neural network, a simulation model.

Поступила в редакцію 22.07.2012

Е.А. ГОРБАТОВА, канд. техн. наук, зав. каф., ФГБОУ ВПО "МГТУ", Магнитогорск,
М.В. ЗАРЕЦКИЙ, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВПО "МГТУ", Магнитогорск,
А.И. ДЮСКИНА, студентка, ФГБОУ ВПО "МГТУ", Магнитогорск

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОМЕТАЛЛУРГИИ

Рассмотрена специфика многокритериального выбора варианта технологического процесса в гидрометаллургии. Обосновано применение методологии нечетких множеств. Рассмотрен многокритериальный анализ вариантов при выборе технологии извлечения ценных компонентов из хвостов обогащения. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: гидрометаллургия, хвосты обогащения, извлечение ценных компонентов, нечеткие множества, экспертная система.

Постановка проблемы. Интенсивное промышленное использование рудных полезных ископаемых привело к существенному сокращению их запасов. В этих условиях становится актуальной задача вовлечения в переработку бедных по содержанию ценных компонентов руд, а также отходов горно-обогатительного и металлургического производства. Отметим также, что переработка отходов горно-обогатительного и металлургического производства позволяет улучшить экологическую обстановку вблизи горно-обогатительных и металлургических предприятий, вернуть в хозяйственный оборот часть земель, занятых хранилищами отходов.

Гидрометаллургические технологии переработки отходов горно-обогатительного и металлургического производства обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с пирометаллургическими [1].

Современное производство может успешно функционировать только при наличии современных автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП), позволяющих проектировать новые и непрерывно совершенствовать существующие технологические процессы. Методологической основой АСТПП в гидрометаллургии является теория гидрометаллургических процессов [1]. Исходя из положений данной теории, авторами были разработаны алгоритмы моделирования равновесных многокомпонентных систем в гидрометаллургии [2].

Промышленные гидрометаллургические процессы переработки отходов металлургического и горно-обогатительного производства

характеризуются неустранимой неопределенностью, обусловленной следующими факторами:

- отходы накапливаются в течение длительного времени;
- на протяжении всего времени хранения отходов в их массе происходят физико-химические процессы, обусловленные неустойчивостью минеральных фаз на дневной поверхности, а также природными факторами (температура воздуха, осадки);
- химический состав отходов нестабилен;
- механические свойства отходов нестабильны.

В условиях неустранимой неопределенности в задании исходных данных особую ценность представляют экспертные суждения специалистов – исследователей, опытных производственников.

Таким образом, АСТПП в рассматриваемой области должны базироваться на сочетании положений теории гидromеталлургических процессов и концепции нечеткой логики [3].

На основании теории гидromеталлургических процессов определяются допустимые параметры технологического процесса. Система, основанная на нечеткой логике, позволяет выбрать наиболее приемлемые из допустимых сочетаний параметры.

Анализ литературы. В настоящее время известны многочисленные применения методологии нечеткой логики для решения разнообразных технических, экономических, социальных задач. Многочисленные технические приложения рассмотрены в работе [4]. Тесно взаимосвязанные проблемы применения искусственных нейронных сетей, генетических алгоритмов и нейронечетких сетей рассмотрены в [5] и [6]. Вопросы применения методологии нечетких множеств и нечеткой логики в инженерии знаний подробно рассмотрены в [7] и [8]. Применение входящего в состав программного продукта MatLab пакета программ Fuzzy Logic Toolbox подробно рассмотрено в [9].

Анализ литературы показывает, что решение сформулированной проблемы может быть получено в виде нечеткой экспертной системы.

Цель статьи. Повышение эффективности АСТПП гидromеталлургического производства путем внедрения методологии нечеткой логики.

Рассмотрим построение работоспособной нечеткой экспертной системы, предназначенной для решения актуальной задачи извлечения ценных компонентов из хвостов обогащения.

В рассматриваемом технологическом процессе из хвостов обогащения извлекаются следующие ценные компоненты: медь, цинк, железо. Для извлечения используется 5% раствор серной кислоты,

который может применяться совместно с интенсификаторами: сульфатом железа, фульвокислотой, ультразвуком. Возможен также вариант применения серной кислоты без интенсификатора.

Будем строить систему, позволяющую выбирать оптимальный вариант ведения технологического процесса. Данную задачу можно рассматривать как задачу нечеткого многокритериального анализа вариантов. В нашем случае имеется четыре варианта ведения технологического процесса и три критерия – выход извлекаемого компонента.

Отметим, что речь не идет о максимизации некоторой скалярной величины, например суммы произведений количества каждого из компонентов на некоторый весовой коэффициент (например, оценку стоимости). Например, возможен случай, когда требуется добиться максимального содержания одного из компонентов при минимальном содержании какого-либо иного.

Обозначим варианты ведения технологического процесса:

- P_1 — интенсификатор – сульфат железа;
- P_2 , — интенсификатор – ультразвуковая обработка;
- P_3 — без интенсификатора;
- P_4 — интенсификатор – фульвокислота.

Обозначим критерии:

- G_1 – извлечение меди;
- G_2 – извлечение цинка;
- G_3 – извлечение железа.

По каждому критерию компетентные эксперты сравнивали между собой все проекты. Результаты сравнения зафиксированы с использованием шкалы Саати [9].

Для критерия G_1 :

- почти существенное преимущество P_1 над P_2 ;
- существенное преимущество P_1 над P_3 ;
- существенное преимущество P_1 над P_4 ;
- почти существенное преимущество P_2 над P_3 ;
- почти существенное преимущество P_2 над P_4 ;
- отсутствует преимущество P_3 над P_4 .

Для критерия G_2 :

- почти существенное преимущество P_2 над P_1 ;

- слабое преимущество P_1 над P_3 ;
- отсутствует преимущество P_1 над P_4 ;
- явное преимущество P_2 над P_3 ;
- существенное преимущество P_2 над P_4 ;
- существенное преимущество P_4 над P_3 .

Для критерия G_3 :

- существенное преимущество P_2 над P_1 ;
- явное преимущество P_3 над P_1 ;
- явное преимущество P_4 над P_1 ;
- существенное преимущество P_3 над P_2 ;
- существенное преимущество P_4 над P_2 ;
- отсутствует преимущество P_3 над P_4 .

Экспертным высказываниям соответствуют матрицы парных сравнений:

$$A(G_1) = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 & 5 \\ 1/4 & 1 & 4 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad A(G_2) = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 3 & 1 \\ 4 & 1 & 7 & 5 \\ 1/3 & 1/7 & 1 & 1/5 \\ 1 & 1/5 & 5 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A(G_3) = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 & 1/7 \\ 5 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 7 & 5 & 1 & 1 \\ 7 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Из полученных матриц сравнений получаем следующие субнормальные нечеткие множества:

$$\tilde{G}_1 = \left(\frac{0,5806}{P_1}, \frac{0,2541}{P_2}, \frac{0,0826}{P_3}, \frac{0,0826}{P_4} \right),$$

$$\tilde{G}_2 = \left(\frac{0,1582}{P_1}, \frac{0,6083}{P_2}, \frac{0,0557}{P_3}, \frac{0,1777}{P_4} \right),$$

$$\tilde{G}_3 = \left(\frac{0,0447}{P_1}, \frac{0,1216}{P_2}, \frac{0,4169}{P_3}, \frac{0,4169}{P_4} \right)$$

Пересечение этих нечетких множеств

$$D = \left(\frac{0,0447}{P_1}, \frac{0,1216}{P_2}, \frac{0,0557}{P_3}, \frac{0,0826}{P_4} \right).$$

Построенная экспертная система рекомендует вариант P_2 , что соответствует интуитивным выводам практиков.

Выводы:

- обоснована методологическая база для построения экспертных систем в гидрометаллургии;
- предложен алгоритм для реализации экспертной системы;
- получены удовлетворительные результаты при работе с реальными данными.

Список литературы: 1. Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М. Вольдман, А.Н. Зеликман. – М.: Metallurgia, 1993. – 400 с. 2. Горбатова Е.А. Компьютерное моделирование равновесных многокомпонентных систем в металлургии / Е.А. Горбатова, А.И. Дюскина, М.В. Зарецкий // Информационные технологии и системы. Материалы Первой международной конференции. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2012. – С. 88 – 90. 3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. / Л. Заде – М.: Мир, 1976. – 165 с. 4. Асаи К. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватедо, С. Иваи и др. – М.: Мир, 1993. – 368 с. 5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. 6. Ярушкіна Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем / Н.Г. Ярушкіна. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с. 7. Сявакко М.С. Інформаційна система "Нечіткий експерт". / М.С. Сявакко. – Львів: Видавничий центр Львівського нац. ун-ту, 2007. – 320 с. 8. Субботін С.О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень / С.О. Субботін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с. 9. Штовба Д.С. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / Д.С. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

Статью представила д.т.н., проф. ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова" Логунова О.С.

УДК 669.053.4:004.896

Експертна система у проектуванні технологічних процесів у гідрометалургії / Горбатова О.О., Зарецький М.В., Дюскина О.І. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968) – С. 40 – 45.

Розглянуто специфіку багатокритеріального вибору варіанта технологічного процесу у гідрометалургії. Обґрунтовано застосування методології нечітких множин. Розглянуто багатокритеріальний аналіз варіантів під час вибору технології видобування цінних компонентів з хвостів збагачення. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: гідрометалургія, хвости збагачення, видобування цінних компонентів, нечіткі множини, експертна система.

UDC 669.053.4:004.896

Expert system in process engineering in hydrometallurgy / Gorbatova E.A., Zaretsky M.V., Dyuskina A.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 40 – 45.

The specificity of multi-choice options process in hydrometallurgy is considered. The application of the fuzzy sets methodology is justified. We consider the multi-criteria analysis of options when choosing a technology to extract valuable components from the tailings. Refs.: 9 titles.

Keywords: hydrometallurgy, tailings, extraction of valuable components, fuzzy sets, expert system.

Поступила в редакцию 30.07.2012

И.Ю. ГРИШИН, канд. техн. наук, зав. кафедрой, РВУЗ "КГУ",
Ялта

ОСНОВАННЫЙ НА ПРИНЦИПЕ МАКСИМУМА МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОГО БИНАРНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Рассмотрен метод решения задачи динамического нелинейного бинарного программирования, когда динамика оптимизируемого процесса описывается разностным уравнением Риккати. Такая задача возникает при разработке методов и алгоритмов оптимального управления статистическими измерительными информационными системами. Для решения предложено применить дискретный принцип максимума в матричном виде и метод последовательных приближений. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: бинарное программирование, измерительная информационная система, оптимальное управление, алгоритм.

Постановка проблемы. При решении задачи управления измерительными информационными системами (ИИС) достаточной статистикой является ковариационная матрица ошибок оценок параметров траекторий сопровождаемых объектов [1]. В процессе минимизации показателя качества сопровождения объектов выбираются оптимальные управляющие воздействия (момент измерения, измерительный канал, объект измерения и т.д.). Управляемые параметры, с точки зрения оптимизационного процесса, представляют собой совокупность бинарных переменных, которые должны быть выбраны на интервале сопровождения таким образом, чтобы минимизировать заданный показатель качества, включающий в себя функции ковариационных матриц в конечный и текущие моменты времени. Существующие методы решения подобных задач [2] основаны на модификациях алгоритма полного перебора и непригодны для применения в системах управления реального времени. Указанная задача относится к классу NP -полных. Следовательно, необходимо разработать метод, позволяющий приближенно, но достаточно быстро решать указанную задачу.

Анализ публикаций. Рассматриваемая задача управления ИИС в режиме оценивания параметров траекторий объектов является нелинейной задачей бинарного программирования. Для ее решения могут быть применены различные численные методы решения оптимизационных задач. Многие из этих методов к настоящему времени представлены в публикациях в виде ряда алгоритмов, учитывающих особенности решения на ЭВМ подобного класса задач [3, 4].

Разработанные для решения целочисленных задач алгоритмы можно разбить на две группы: алгоритмы перебора и алгоритмы отсечения.

С помощью алгоритмов, как первой, так и второй группы может быть получено точное решение рассматриваемой задачи управления наблюдениями. Однако все существующие к настоящему времени методы не могут быть использованы в алгоритмическом обеспечении систем управления реального времени, поскольку решение подобных задач требует существенных временных затрат, измеряемых десятками секунд для небольшого количества управляемых параметров и сопровождаемых объектов (до 5 – 10) и часами для реальных ИИС, когда число управляемых параметров может достигать нескольких десятков при количестве сопровождаемых объектов до нескольких сотен. Предлагаемый метод главных граней [5], возможно, позволит решать подобные задачи, но он требует еще длительной доработки для практического применения в системах управления реального времени. Следовательно, точные методы не могут быть использованы в практических алгоритмах управления.

Цель статьи. Разработать метод оптимизации управления для применения в системах управления реального времени.

Изложение основного материала. Учитывая динамический характер задач управления наблюдениями, для приближенного их решения могут быть использованы алгоритмы, основанные на дискретном аналоге принципа максимума [6]. Причем, учитывая, что управляемый объект наиболее ясно и просто записывается в матричном виде, целесообразно применить и принцип максимума (минимума) в матричном виде [7].

Качество управления наблюдениями в задаче фильтрации измеряемых параметров можно охарактеризовать следующим функционалом:

$$J = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{t=1}^T tr(\mathbf{h}_i(t)\Psi_i(t)) + \sum_{j=1}^M \sum_{t=0}^T \left[\alpha^{ij}(t)\Gamma_j(t) + \alpha^{ij}(t)(1 - \alpha^{ij}(t-1))\gamma_j(t) \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь $tr(\mathbf{h}_i(t)\Psi_i(t)) = \sum_{v=1}^k h_i^{vv}(t)\Psi_i^{vv}(t)$ – характеризует взвешенную

величину ошибки фильтрации координат i -го объекта, причем возможность изменения элементов диагональных матриц $\mathbf{h}_i(t)$

позволяет выделять те координаты, точность оценивания которых желательно повысить; $\Psi_i(t)$ – корреляционная матрица ошибок оценивания координат i -го объекта в t -й момент времени; элемент матрицы управления $\alpha^{ij}(t) \in \{0, 1\}$, 1 – производится измерение параметров i -го объекта j -м каналом в t -й момент времени; $\Gamma_j(t)$, $\gamma_j(t)$ – параметры, характеризующие соответственно "стоимости" проведения измерения и переключения j -го канала в t -й момент времени.

Задача управления наблюдениями ИИС при сопровождении объектов заключается в нахождении параметров процесса

$$\begin{aligned} &\alpha(0), \alpha(1), \dots, \alpha(T-1), \\ &\Psi_i(0), \Psi_i(1), \dots, \Psi_i(T-1), \Psi_i(T), \quad i=1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (2)$$

удовлетворяющих ряду условий. При этом выполнены начальные условия $\Psi_i(0) = \Psi_{i0}$, $i=1, 2, \dots, N$, и функционал (1) принимает наименьшее возможное значение.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем.

Уравнение состояния представляется в виде

$$\begin{aligned} &\Psi_i(t+1) - \Psi_i(t) = F_i(t, \Psi_i(t), \alpha(t)) = \\ &\quad \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T - \Psi_i(t) - \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \times \\ &\quad \times \sum_{j=1}^M \{ \alpha^{ij}(t) \mathbf{H}_j^T (\mathbf{H}_j \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \mathbf{H}_j^T + \mathbf{R}_j)^{-1} \mathbf{H}_j \} \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}(t+1) - \mathbf{X}(t) = \mathbf{F}_{N+1}(t) = \alpha(t) - \mathbf{X}(t),$$

$$\Psi_i(0) = \Psi_{i0}, \mathbf{X}(0) = 0, \quad i=1, 2, \dots, N; \quad t=1, 2, \dots, T-1.$$

Здесь Φ_i – матрица экстраполяции параметров с момента времени t на момент $t-1$; \mathbf{H}_j – матрица наблюдения; M – количество каналов наблюдения; N – количество наблюдаемых объектов.

Таким образом, задача управления ИИС в режиме сопровождения объектов состоит в минимизации функционала по матрице управления $\alpha(t)$, удовлетворяющей ограничениям и при наличии связей, заданных в виде системы разностных уравнений.

Введем матрицу состояния

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y}(t) &= [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t), y_{N+1}(t)] = \\
 &= [\Psi_1(t), \Psi_2(t), \dots, \Psi_N(t), \mathbf{X}(t)], \\
 & i = 1, 2, \dots, N, \quad y_{N+1}(t) = \mathbf{X}(t).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Тогда гамильтониан системы может быть представлен в следующем виде

$$\begin{aligned}
 H(\mathbf{y}(t), \mathbf{P}(t+1), \alpha(t)) &= \sum_{i=1}^{N+1} F_i[t, y_i(t), \alpha(t)] \mathbf{P}_i^T(t+1) + \\
 &+ \sum_{i=1}^N \{tr(\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)) + \sum_{j=1}^M \alpha^{ij}(t) [\Gamma_j(t) + (1 - x^{ij}(t)) \gamma_j(t)]\}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Канонические уравнения для расчета матриц сопряженных переменных $\mathbf{P}_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N+1$ к матрицам состояния $\mathbf{y}_i(t)$ представляются в виде

$$\mathbf{P}_i(t+1) - \mathbf{P}_i(t) = - \frac{\partial H(\mathbf{y}(t), \mathbf{P}(t+1), \alpha(t))}{\partial \mathbf{y}_i(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, N+1. \tag{6}$$

Граничные условия для сопряженной системы задаются в конце интервала наблюдения

$$\mathbf{P}_i(T) = \frac{\partial [tr(\mathbf{h}_i(T) \Psi_i(T))]}{\partial \Psi_i(T)} = \mathbf{h}_i^T(T), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad \mathbf{P}_{N+1}(T) = 0. \tag{7}$$

Проанализировав состав выражения можно сделать вывод о том, что гамильтониан имеет структуру

$$H(\mathbf{y}(t), \mathbf{P}(t+1), \alpha(t)) = H_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha^{ij}(t) H_{\alpha}^{ij}(t). \tag{8}$$

Таким образом, гамильтониан линеен по управлениям $\alpha^{ij}(t)$, что является важным выводом для синтеза практически реализуемых алгоритмов управления.

Применение дискретного принципа минимума состоит в том, что на оптимальной в смысле минимума функционала (1) последовательности матриц управления $\alpha(t)$, $t = 1, 2, \dots, T-1$, удовлетворяющей заданным условиям, гамильтониан H , определяемый соотношениями (5) или (8), достигает своего минимума. Из минимума гамильтониана H с учетом ограничений на $\alpha(t)$, следует вывод, что в каждый момент времени

$t \in \{1, 2, \dots, T-1\}$ оптимальное управление $\mathbf{a}(t)$ будет удовлетворять следующим условиям:

1. $\alpha^{ij}(t) = 0$ для тех целей из множества $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, для которых выполняется хотя бы одно из условий

$$\begin{aligned} H_{\alpha}^{ij}(t) &> 0, \\ H_{\alpha}^{ij}(t) &> \min_{v \in \{1, 2, \dots, N\}} H_{\alpha}^{vj}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad t \in \{1, 2, \dots, T-1\}.$$

2. $\alpha^{ij}(t) = 1$ в том случае, когда существует такое значение из множества $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, для которого выполняются условия

$$\begin{aligned} H_{\alpha}^{ij}(t) &= \min_{v \in \{1, 2, \dots, N\}} H_{\alpha}^{vj}(t), \\ j &\in \{1, 2, \dots, M\}, \quad t \in \{1, 2, \dots, T-1\}. \end{aligned} \quad (10)$$

3. $\alpha^{ij}(t)$ могут быть особыми управлениями, которые подробно рассмотрены в монографии [8], однако практика применения рассматриваемого метода для управления ИИС в естественных условиях функционирования показала, что они не встречаются и могут обсуждаться с сугубо теоретической точки зрения.

Обычно получить аналитическое решение в рассматриваемой задаче оптимального управления ИИС в режиме сопровождения объектов в большинстве случаев не удастся (за исключением случаев применения таких фильтров обработки поступающей информации о целях, в которых динамика ковариационных матриц ошибок оценок параметров описывается линейными уравнениями). Поэтому применяются численные методы для ее решения, например, основанный на дискретном принципе максимума метод, называемый методом последовательных приближений [9, 10].

Выводы. В результате проделанной работы предложен метод решения прикладной задачи нелинейного бинарного программирования, который не требует для своей реализации больших вычислительных затрат и может быть применен в системе управления реального времени.

Список литературы: 1. *Grigorev F.N.* Control of the observation process in continuous systems / *F.N. Grigorev, N.A. Kuznetsov* // *Probl. Contr. and Inform. Theory.* – 1977. – Vol. 6 (3). – P. 181–201. 2. *Ахо А.* Построение и анализ вычислительных алгоритмов / *А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман.* – М.: Мир, 1979. – 536 с. 3. *Романовский Н.В.* Алгоритмы решения экстремальных задач / *Н.В. Романовский.* – М.: Наука, 1977. – 352 с. 4. *Хохлюк В.И.* Задачи целочисленной оптимизации (преобразования) / *В.И. Хохлюк.* – Новосибирск: НГУ, 1979. – 92 с. 5. *Grishin I.* Linear programming: a new polynomial-time algorithm / *I. Grishin,*

G. Potapov // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2007. – № 1 (107). – С. 113–119. **6.** Фан Лянь-Цзэнь. Дискретный принцип максимума / Лянь-Цзэнь Фан, Чу-Сен Вань. – М.: Мир, 1967. – 180 с. **7.** Athans M. The matrix minimum principle / M.Athans. – Massachusetts Institute of Technology Electronic Systems Laboratory Report ESL-R-317, Cambridge, Massachusetts, 1967. – 19 p. **8.** Григорьев Ф.Н. Управление наблюдениями в автоматических системах / Ф.Н. Григорьев, Н.А. Кузнецов, А.П. Серебровский. – М.: Наука, 1986. – 216 с. **9.** Крылов И.А. О методе последовательных приближений для решения задач оптимального управления / И.А. Крылов, Ф.Л. Черноусько // Журн. вычислит. мат. и мат. физ. – 1962. – Т. 2. – № 6. – С. 1132–1139. **10.** Крылов И.А. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления / И.А. Крылов, Ф.Л. Черноусько // Журн. вычислит. мат. и мат. физ. – 1972. – Т. 12. – № 1. – С. 14–34.

Статью представил д.ф.-м.н., проф. РВУЗ "КГУ" Муцай Ю.Н.

УДК 004.02:517.97

Заснований на принципі максимуму метод розв'язання задачі нелінійного бінарного програмування / Грішин І.Ю. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968) – С. 46 – 51

Розглянутий метод розв'язання задачі динамічного нелінійного бінарного програмування, коли динаміка процесу, що оптимізується, описується різницеvim рівнянням Рікати. Така завдання виникає при розробці методів і алгоритмів оптимального управління статистичними вимірювальними інформаційними системами. Для вирішення запропоновано застосувати дискретний принцип максимуму в матричному виді і метод послідовних наближень. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: бінарне програмування, вимірювальна інформаційна система, оптимальне управління, алгоритм.

UDC 004.02:517.97

Method of solution of nonlinear binary programming problem, which is based on maximum principle / Grishin I.Y. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968) – P. 46 – 51

The method of solving of problem of the dynamic nonlinear binary programming is considered, when the dynamics of the optimized process is described by difference Riccati equation. This problem arises in the development of methods and algorithms for optimal control of the statistical measurement of information systems. To apply the solutions proposed discrete maximum principle in matrix form and the method of successive approximations. Refs.: 10 titles.

Keywords: binary programming, measuring information system, an optimal control algorithm.

Поступила в редакцію 30.07.2012

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

ДИСКРЕТНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ АРТ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ИДЕИ ИММУНОКОМПЬЮТИНГА

Разработаны дискретные нейронные сети адаптивной резонансной теории, использующие при классификации входных изображений не только параметр сходства между входным изображением и изображением, хранящемся в весах связей нейронной сети, но и идеи положительного и отрицательного отбора в иммунных системах живых организмов.

Ключевые слова: дискретные нейронные сети адаптивной резонансной теории, параметр сходства, положительный и отрицательный отбор в иммунных системах.

Постановка проблемы и анализ литературы. Многие нейронные сети пригодных для разработки высокоэффективных систем распознавания, классификации, прогнозирования, идентификации [1 – 7]. Большой интерес к нейросетевым системам распознавания, классификации и т.д. связан с тем, что они имеют ряд полезных свойств, которых часто трудно добиться с помощью других методов. В частности, речь идет об их универсальности, о возможности построения нейронных сетей под задачу, о возможности обучения на примерах, о самообучении и обобщении, распознавании новой информации, об использовании ассоциаций, о распознавании и классификации зашумленных изображений и т.д. В тоже время существуют и определенные проблемы при разработке систем на основе нейронных сетей. Прежде всего, это связано с особенностью обучения нейронных сетей, которая, как правило, требует наличия всей исходной информации, поскольку обучение новому образу методом обратного распространения ошибки или генетическими алгоритмами, или другими методами требует, как правило, полного переобучения сети. Невозможность с помощью уже известных нейронных сетей решить проблему восприятия новой информации при сохранении уже имеющейся (т.е. решить проблему стабильности – пластичности) привело к разработке принципиально новых конфигураций нейросетей – сетей адаптивной резонансной теории (АРТ). Эти сети в определенной степени решают противоречивые задачи чувствительности (пластичности) к новым данным и сохранения полученной ранее информации (стабильности). Поэтому многие задачи, указанные выше, могут решаться на основе нейросетей АРТ [6 – 10]. Однако известные дискретные нейронные сети АРТ имеют и

существенные недостатки, связанные со способом распознавания входных изображений, использующим параметр сходства.

При малых значениях параметра сходства в режиме распознавания память нейронной сети АРТ не имеет необходимого объема информации (наборов фрагментов изображений) для принятия обоснованных решений, а при больших значениях параметра аналогичные изображения, отличающиеся небольшим числом второстепенных деталей, запоминаются как прототипы разных классов изображений с помощью разных Y -нейронов. Это затрудняет практическое использование сетей АРТ.

Целью статьи является разработка новых архитектур и алгоритмов функционирования дискретных нейронных сетей адаптивной резонансной теории, позволяющих расширить область применения этих сетей.

Архитектура и алгоритмы функционирования сети АРТ-1. Архитектура нейронной сети АРТ-1 приведена на рис. 1. Эта сеть относит предъявленное входное изображение к одному из запомненных классов только в том случае, если оно достаточно похоже на прототип этого класса, то есть на изображение, хранящееся в весах связей нейронной сети. Если такое свойство, установленное с помощью специального параметра сходства между двумя изображениями [8 – 11], имеет место в режиме обучения, то найденный прототип модифицируется, чтобы стать более похожим на предъявленное сети входное изображение. При отсутствии достаточного сходства между предъявленным изображением и прототипами всех имеющихся классов, оно запоминается сетью как прототип нового класса. Это возможно благодаря тому, что информация об изображениях-прототипах хранится локально, только в весах связей одного распознающего нейрона, и сеть имеет значительное число неиспользуемых распознающих нейронов, избыток которых уменьшается по мере поступления новой входной информации. Наличие избыточных распознающих нейронов является принципиальной особенностью нейронных сетей АРТ, поскольку при их отсутствии новые входные изображения просто теряются. Таким образом, локальное хранение информации и наличие избыточных распознающих нейронов позволяет запоминать новую информацию (новые образы), не искажая или теряя уже имеющуюся [8 – 11].

Основу архитектуры нейронной сети составляют три слоя нейронов:

– слой чувствительных S -нейронов, воспринимающих входную информацию в виде черно-белых изображений или бинарных входных векторов;

- слой бинарных интерфейсных Z -нейронов; Z - и S -элементы объединяются в поле F_1 входных обрабатывающих нейронов;
 - слой распознающих Y -нейронов.
- Кроме этого имеются еще три управляющих нейрона: R , G_1 и G_2 .

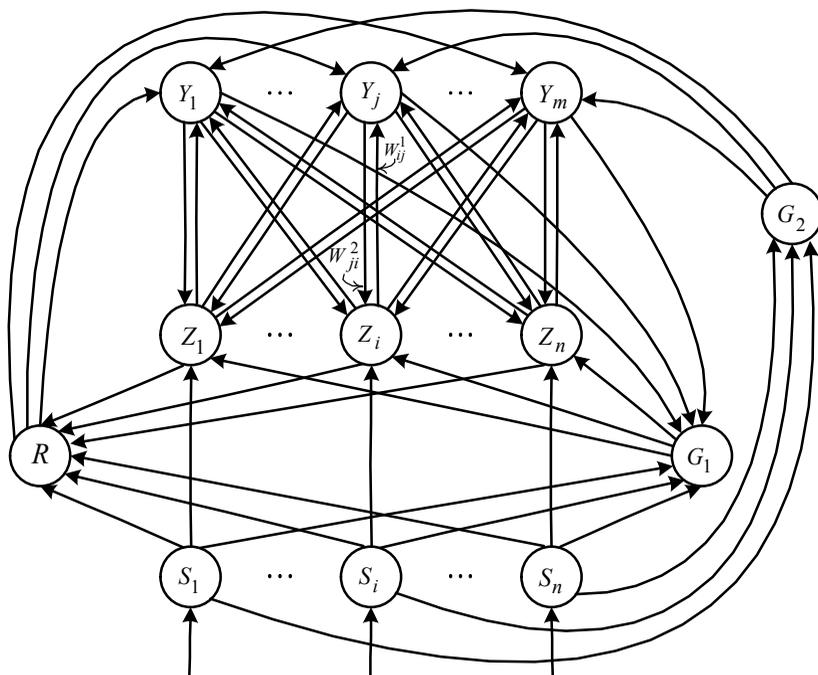


Рис. 1. Архитектура нейронной сети АРТ-1

Выход каждого бинарного нейрона S_i ($i = \overline{1, n}$) входного слоя связан одной однонаправленной связью с единичным весовым коэффициентом с бинарным нейроном Z_i ($i = \overline{1, n}$) интерфейсного слоя. Выходные сигналы всех чувствительных элементов поступают также по связям с единичными весовыми коэффициентами на входы управляющих нейронов R , G_1 и G_2 . Каждый интерфейсный нейрон Z_i ($i = \overline{1, n}$) связан со всеми элементами Y_j ($j = \overline{1, m}$) распознающего слоя и с управляющим нейроном R . Связи с весовыми коэффициентами

W_{ij}^1 ($i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$), $0 \leq W_{ij}^1 \leq 1$ передают сигналы с выхода каждого Z -элемента на входы каждого Y -нейрона. Бинарные связи с весовыми коэффициентами W_{ji}^2 ($j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}$) связывают выход каждого распознающего нейрона с входом каждого интерфейсного нейрона. На входы каждого Z -элемента по связям с единичными весовыми коэффициентами поступает также сигнал с выхода бинарного управляющего нейрона G_1 . Сигналы с выходов всех Z -элементов по связям с единичными весовыми коэффициентами поступают на входы управляющего нейрона R . Такими же связями выходы всех распознающих нейронов соединены со входами нейрона G_1 , а их входы – с выходами управляющих нейронов G_2 и R . В любой момент времени нейроны S_i и Z_i ($i = \overline{1, n}$), G_1 и G_2 находятся в одном из двух состояний: 0 или 1.

Нейроны Y -слоя с помощью дополнительной нейронной сети, на рис. 1 не показанной, образуют слой конкурирующих нейронов. Каждый элемент Y_j ($j = \overline{1, m}$) распознающего слоя может находиться в одном из четырех состояний:

- активен, сеть АРТ-1 функционирует в режиме определения выходных сигналов нейронов распознающего слоя, выходной сигнал $U_{\text{вых}Y_j}$ удовлетворяет условию $0 \leq U_{\text{вых}Y_j} \leq 2$ и определяется выходными

сигналами Z -элементов:
$$U_{\text{вых}Y_j} = U_{\text{вх}Y_j} = \sum_{i=1}^n W_{ij}^1 U_{\text{вых}Z_i};$$

- активен, $U_{\text{вых}Y_j} = 1$, нейрон Y_j является победителем при текущем предъявлении входного изображения;

- неактивен, $U_{\text{вых}Y_j} = 0$, нейрон установлен в начальное состояние или проиграл соревнование с другими нейронами при текущем предъявлении входного изображения;

- заторможен, $U_{\text{вых}Y_j} = -1$, информация, хранящаяся в весах связей нейрона, не удовлетворяет текущему входному изображению по величине параметра сходства, поэтому нейрон исключен из соревнования.

Все связи нейронной сети АРТ-1 являются возбуждающими, за исключением связей от Y -элементов к нейрону G_1 и от интерфейсных Z -элементов к нейрону R , которые передают тормозящие сигналы.

Z- и Y-нейроны получают сигналы из трех источников: Z-нейроны – от управляющего нейрона G_1 и от нейронов слоев S и Y; Y-нейроны – от управляющих нейронов G_2 , R и от Z-нейронов. Z- и Y-элементы переходят в активное состояние по правилу "два из трех", то есть только при наличии сигналов из двух различных источников. Например, если Y-нейрон получает только n единичных сигналов с выходов всех Z-элементов, но нет возбуждающего сигнала от управляющего нейрона G_2 , то перейти в активное состояние он не может.

Для обучения дискретных нейронных обычно используется метод быстрого обучения, при котором равновесные веса связей нейронов определяются за одно предъявление входного изображения [9 – 11].

В исходном состоянии перед началом обучения все нейроны сети имеют нулевые выходные сигналы. При подаче на вход сети первого бинарного изображения $S^1 = (S_1^1, S_2^1, \dots, S_n^1)$ S-элементы, получившие единичные входные сигналы, переходят в активное состояние. Их единичные возбуждающие сигналы переводят в активное состояние управляющие нейроны G_1 и G_2 , а также поступают на входы соответствующих интерфейсных нейронов. Поскольку Z-нейроны переходят в активное состояние по правилу "два из трех", то в активное состояние перейдут только те Z-элементы, которые получают единичные входные сигналы как от нейрона G_1 , так и от соответствующего S-элемента. Возбуждающие сигналы с выходов Z-элементов по связям с весами W_{ij}^1 ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$) поступают на входы всех распознающих нейронов. Y-нейроны в активное состояние переходят, получая возбуждающие сигналы как от Z-нейронов, так и от управляющего нейрона G_2 . Входные и выходные сигналы распознающих нейронов рассчитываются по соотношениям:

$$U_{\text{вх}Y_j} = \sum_{i=1}^n W_{ij}^1 U_{\text{вых}Z_i}, \quad U_{\text{вых}Y_j} = U_{\text{вх}Y_j}, \quad j = \overline{1, m}.$$

При этом веса связей W_{ij}^1 подобраны таким образом, чтобы выходные сигналы нейронов Y-слоя удовлетворяли условию $0 \leq U_{\text{вых}Y_j} \leq 2$, $j = \overline{1, m}$.

Затем с помощью дополнительных нейронов и связей, не показанных на рис. 1, в Y-слое происходит выделение единственного нейрона J с максимальным выходным сигналом. Если оказывается, что в

Y -слое имеется несколько элементов с одинаковым максимальным сигналом, то в качестве нейрона-победителя выделяется Y -нейрон, имеющий минимальный индекс. В результате латерального процесса на выходах Y -нейронов появятся следующие сигналы:

$$U_{\text{вых}Y_j} = 1, U_{\text{вых}Y_j} = 0, j = \overline{1, m}, j \neq J.$$

Единичный возбуждающий сигнал нейрона-победителя Y_J поступает на входы всех интерфейсных нейронов и этот же единичный сигнал переводит в неактивное состояние нейрон G_1 . Поскольку интерфейсные элементы переходят в активное состояние по правилу "два из трех", то единичные выходные сигналы появятся на выходах только тех Z -нейронов, которые получают возбуждающий сигнал как от нейрона Y_J , так и от S -элемента. Возбуждающие сигналы с выходов элементов входного слоя и тормозящие с выходов Z -слоя поступят на входы управляющего нейрона R , который, в зависимости от отношения числа этих сигналов, либо переходит в активное состояние ($U_{\text{вых}R} = 1$), либо остается пассивным ($U_{\text{вых}R} = 0$). При пассивном управляющем R -нейроне в сети АРТ-1 наступает резонанс и происходит адаптация весов связей W_{ij}^1 , W_{ji}^2 ($i = \overline{1, n}$) нейрона-победителя с помощью входного изображения. Если управляющий нейрон R – активен, то его единичный выходной сигнал затормаживает нейрон-победитель Y_J ($U_{\text{вых}Y_j} = -1$), исключая его из участия в соревнованиях распознающих нейронов при текущем входном изображении. После этого в выходном слое определяется новый нейрон-победитель. Если ни одно из изображений, хранящихся в весах связей распределенных Y -нейронов не оказывается близким к входному, то все распределенные нейроны будут заторможены и нейроном-победителем окажется нераспределенный элемент с минимальным индексом, который и запомнит в весах связей предъявленное изображение.

Недостаток нейронной сети АРТ-1. Поясним недостаток сети с помощью следующего примера.

Пусть нейронная сеть обучена распознаванию трех классов изображений с помощью эталонных черно-белых изображений, приведенных на рис. 2.

Возьмем сеть со следующими параметрами: $m = 3$ – число Y -нейронов в распознающем слое сети; $n = 64$ – число нейронов во

входном слое сети; $p = 0,8$ – параметр сходства; $L = 2$ – константа, для коррекции весов связей W_{ij}^1 ($i = \overline{1, 64}$; $j = \overline{1, 3}$) в процессе обучения.

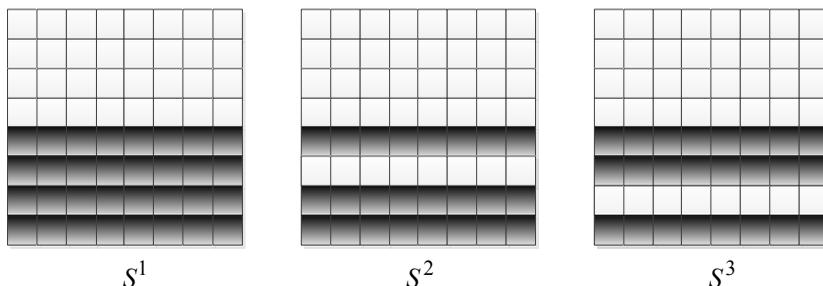


Рис. 2. Эталонные черно-белые изображения

В процессе обучения получены следующие веса связей:

$$W_{i1}^1 = 0 \text{ при } i = \overline{1, 32}; W_{i1}^1 = 0,059 \text{ при } i = \overline{33, 64};$$

$$W_{i2}^1 = 0 \text{ при } i = 1, 2, \dots, 32, 41, 42, \dots, 48;$$

$$W_{i2}^1 = 0,080 \text{ при } i = 33, 34, \dots, 40, 49, 50, \dots, 64;$$

$$W_{i3}^1 = 0 \text{ при } i = 1, 2, \dots, 32, 49, 50, \dots, 56;$$

$$W_{i3}^1 = 0,080 \text{ при } i = 33, 34, \dots, 48, 57, \dots, 64,$$

где W_{ij}^1 – вес связи от i -го Z -нейрона к j -му Y -нейрону, $i = \overline{1, 64}$; $j = \overline{1, 3}$.

Расчёт весов связей нейронной сети выполняется с помощью известного алгоритма быстрого обучения [10 – 12].

При подаче на вход нейронной сети изображения S^1 после простых вычислений получим:

$$U_{\text{вх}Y_1} = \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}Z_i} W_{i1} = 0,059 \cdot 32 = 1,888;$$

$$U_{\text{вх}Y_2} = \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}Z_i} W_{i2} = 0,080 \cdot 24 = 1,920;$$

$$U_{\text{вх}Y_3} = \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}Z_i} W_{i3} = 0,080 \cdot 24 = 1,920.$$

Поскольку нейрон Y_2 имеет меньший индекс, то он становится нейроном-победителем, однако определение параметра сходства

$p = \|U_{\text{ВЫХ}Z}\| / \|U_{\text{ВЫХ}S^1}\| = 24 / 32 = 0,75$ показывает, что полученное значение параметра сходства меньше заданного, поэтому нейрон Y_2 затормаживается. По этой же причине затормаживается и нейрон Y_3 . Таким образом, победителем становится нейрон Y_1 . Параметр сходства в этом случае равен единице:

$$p = \|U_{\text{ВЫХ}Z}\| / \|U_{\text{ВЫХ}S^1}\| = 32 / 32 = 1.$$

Аналогично, при подаче на вход нейронной сети эталонных изображений S^2 , S^3 нейронами-победителями становятся соответственно нейроны Y_2 и Y_3 , т.е. эталонные изображения правильно распознаются нейронной сетью.

При подаче на вход сети изображения S^1 , у которого из-за помех утеряны два единичных элемента в шестой строке имеем:

$$U_{\text{ВХ}Y_1} = \sum_{i=1}^{64} U_{\text{ВЫХ}Z_i} W_{i1} = 0,059 \cdot 30 = 1,770;$$

$$U_{\text{ВХ}Y_2} = \sum_{i=1}^{64} U_{\text{ВЫХ}Z_i} W_{i2} = 0,080 \cdot 24 = 1,920;$$

$$U_{\text{ВХ}Y_3} = \sum_{i=1}^n U_{\text{ВЫХ}Z_i} W_{i3} = 0,080 \cdot 22 = 1,760.$$

Из результатов расчетов следует, что нейрон Y_2 становится победителем, однако в этом случае норма входного вектора уменьшается и параметр сходства получается равным 0,8:

$$p = \|U_{\text{ВЫХ}Z}\| / \|U_{\text{ВЫХ}S}\| = 24 / 30 = 0,8.$$

Таким образом, нейрон Y_2 окончательно становится победителем и выходное изображение относится ко второму классу.

Неудача с распознаванием изображения S^1 связана с тем, что используется параметр сходств, который учитывает наличие только единичных элементов во входном изображении и изображении, хранящемся в весах связей нейрона-победителя. При этом расположение единичных элементов во входном изображении не учитывается. Для преодоления этого недостатка нейронной сети предлагается воспользоваться механизмами положительного и отрицательного отбора

в иммунных системах живых организмов, которые успешно применяются в иммунокомпьютинге [13, 14]. Если в рассматриваемом примере использовать детекторы отрицательного отбора, которые затормаживают нейрон-победитель, если во входном изображении наблюдаются аномалии, не характерные для распознаваемого изображения, то дискретная сеть АРТ будет правильно распознавать входные изображения и в условиях помех. Для достижения указанного эффекта изменим архитектуру исходной нейронной сети и алгоритм её функционирования в режиме распознавания.

На рис. 3 изображена нейронная сеть АРТ-1 с бинарными детекторами отрицательного отбора $DY_{11}, \dots, DY_{1k}, DY_{21}, \dots, DY_{m1}, \dots, DY_{mk}$. Каждый распознающий Y -нейрон имеет k детекторов. Детекторы переводятся в активное состояние единичным сигналом нейрона-победителя. Они выполняют сравнение фрагментов распознаваемого изображения с фрагментами, хранящимися в детекторах. В иммунокомпьютинге для сравнения бинарных строк (векторов) используются различные метрики: R -chunks, Хемминга, R&T, Левенштейна [13]. Для дискретной нейронной сети АРТ наиболее удобно использование расстояния Хемминга, которое между двумя двоичными векторами равно числу компонент, в которых векторы различны.

Если детектор отрицательного отбора обнаруживает, что с заданной точностью сравниваемые фрагменты различны, то он своим единичным сигналом затормаживает нейрон-победитель, исключая его из соревнования при предъявлении текущего входного изображения. Если ни один из детекторов, возбужденных нейроном-победителем, не обнаруживает аномальных фрагментов во входном изображении, то дальнейшее функционирование модифицированной нейронной сети не отличается от функционирования сети АРТ-1.

В рассматриваемом примере для предотвращения ошибок при распознавании достаточно использовать только два детектора отрицательного отбора (рис. 4).

Детектор DY_2 должен содержать в качестве эталонного фрагмент, с которым сравнивается соответствующий фрагмент входного изображения, шестую строку изображения S^2 , а детектор DY_3 – седьмую строку изображения S^3 . При подаче на вход нейронной сети изображения S^1 , в котором из-за помех отсутствует несколько единичных компоненты в шестой строке, в начале нейроном-победителем станет нейрон Y_2 , однако он будет заторможен детектором DY_2 .

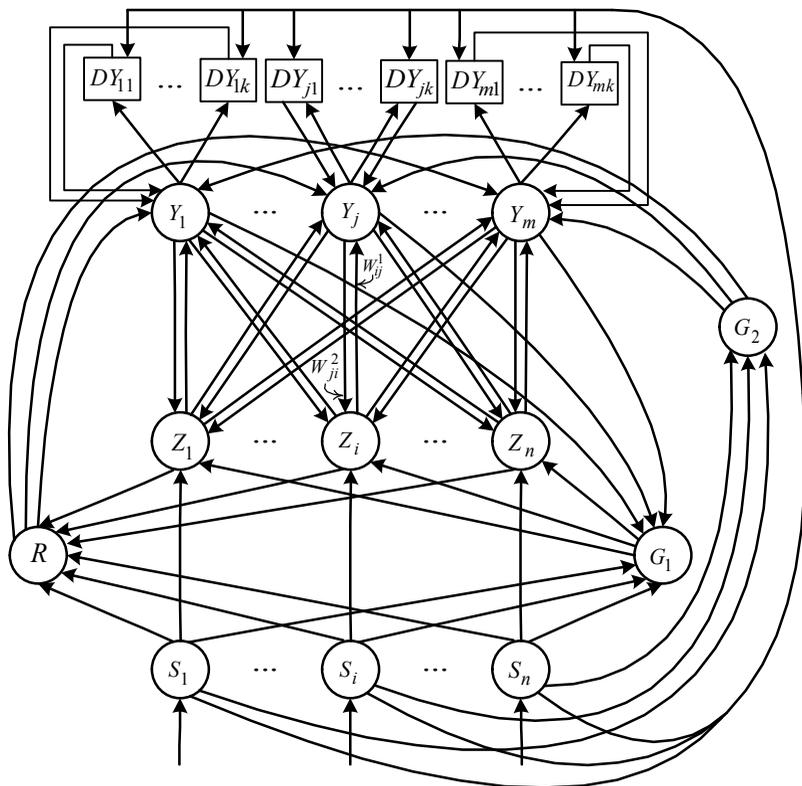


Рис. 3. Нейронная сеть АРТ-1 с детекторами отрицательного отбора

Действительно, пусть в изображении S^1 отсутствует по три единичных элемента в строках шесть и семь. В этом случае на входах Y -нейронов будут следующие сигналы:

$$U_{\text{вх}Y_1} = \sum_{i=1}^{64} U_{\text{вх}Z_i} W_{i1} = 0,059 \cdot 26 = 1,534;$$

$$U_{\text{вх}Y_2} = \sum_{i=1}^{64} U_{\text{вх}Z_i} W_{i2} = 0,080 \cdot 21 = 1,680;$$

$$U_{\text{вх}Y_3} = \sum_{i=1}^n U_{\text{вх}Z_i} W_{i3} = 0,080 \cdot 21 = 1,680.$$

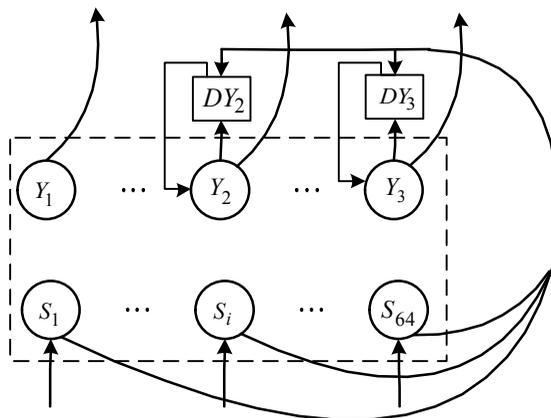


Рис. 4. Нейронная сеть АРТ для распознавания зашумленных изображений S^1 , S^2 , S^3

Поэтому вначале нейроном-потребителем будет нейрон Y_2 , который будет заторможен детектором DY_2 . Если бы детектор DY_2 отсутствовал, то по параметру сходства $p = \frac{\|Z_{\text{вых}S^1}\|}{\|U_{\text{вых}S^1}\|} = 21/26 = 0,808$ входное изображение было бы ошибочно отнесено ко второму классу. Поскольку нейрон Y_2 затормаживается детектором DY_2 , то следующим нейроном-победителем будет нейрон Y_3 , который затормаживается детектором DY_3 . Только после того, как заторможены нейроны Y_2 и Y_3 , нейроном-победителем становится нейрон Y_1 . Определение параметра сходства для этого изображения ($p = 26/32 = 0,812$) показывает, что входное изображение относится к первому классу.

Таким образом, рассмотренный пример распознавания изображений подтверждает эффективность использования в дискретных нейронных сетях детекторов отрицательного отбора, характерных для иммунокомпьютинга.

Выводы. Проанализирован недостаток известных дискретных нейронных сетей адаптивной резонансной теории, не позволяющий эффективно применять их для классификации или распознавания входных изображений в условиях шума. Предложены архитектурные изменения в дискретной нейронной сети АРТ-1, обеспечивающие повышение помехоустойчивости сети за счет применения на этапе определения нейрона-победителя детекторов отрицательного отбора применяемых в иммунокомпьютинге.

Список литературы: 1. Wang Bielei Zhao, Lin Tan Zhenfan. Neural network based online self-learning adaptive PID control // Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, Hefei, China, 28 June – 2 July 2000. – Vol. 2. – P. 908 – 910. 2. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с. 3. Neural networks for control / Edited by W. Thomas Miller III, Richard S. Sutton, and Paul J. Werbos, – Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press, 1996. – 524 P. 4. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 5. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том 2 / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 464 с. 6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 7. Комарцова Л.Г. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов / Л.Г. Комарцова, А.В. Максимов. – М.: Изд-во им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с. 8. Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance // Cognitive Science – 1987. – Vol. 11. – P. 23 – 63. 9. Carpenter G.A., Grossberg S. A massively parallel architecture for selforganizing neural pattern recognition machine // Computing, Vision, Graphics and Image Processing. – 1987. – Vol. 37. – P. 54 – 115. 10. Дмитриенко В.Д. Моделирование технологических процессов механообработки методами искусственного интеллекта: монография / В.Д. Дмитриенко, И.П. Хавина, В.Л. Хавин, В.В. Везуб. – Харьков: НТМТ, 2009. – 224 с. 11. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p. 12. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заповловский Н.И., Леонов С.Ю. – Х.: ХФИ Транспорт Украины, 2003. – 248 с. 13. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов: монография / С.А. Субботин, А.А. Олейник, Е.А. Гофман и др. / Под редакцией С.А. Субботина. – Х.: Компания СМІТ, 2012. – 318 с. 14. Искусственные иммунные системы и их применение / Под редакцией Д. Дасгунты. – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.

УДК 519.71:004.89

Дискретні нейронні мережі АРТ, які використовують ідеї імунотехнологій / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 52 – 63.

Розроблені дискретні нейронні мережі адаптивної резонансної теорії, які використовують при класифікації вхідних зображень не тільки параметр подібності між вхідним зображенням і зображенням, що зберігається у вагах зв'язків нейронної мережі, але й ідеї позитивного і негативного відбору в імунних системах живих організмів.

Ключові слова: дискретні нейронні мережі адаптивної резонансної теорії, параметр подібності, позитивний і негативний відбір в імунних системах. Іл.: 4. Бібліогр.: 14 назв.

UDC 519.71:004.89

Diskette neural network ART, ideas immunocomputing / Dmitrienko V.D., Zakovorotnyi A.Y. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 52 – 63.

Developed discrete neural network adaptive resonance theory, using the classification of input images is not only setting the similarity between the input image and the image stored in the weights of the neural network connections, but also the idea of positive and negative selection in the immune systems of living organisms. Figs.: 4. Refs.: 14 titles.

Keywords: discrete neural network adaptive resonance theory, parameter similarity, the positive and negative selection in the immune system.

Поступила в редакцію 30.07.2012

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

І.О. ДУДКО, аспірант, КПУ, Запоріжжя,
В.Є. БАХРУШИН, д-р физ.-мат. наук, проф., КПУ, Запоріжжя

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ k -СЕРЕДНІХ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ НЕОДНОРІДНИХ РОЗПОДІЛІВ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

У статті розглянуто проблему побудови моделей неоднорідного розподілу випадкових величин. Запропоновано процедуру, що передбачає попереднє оцінювання кількості та параметрів складових та їх подальше уточнення методами мінімізації розрахункових значень критерію Колмогорова–Смирнова або критерію типу омега-квадрат. Наведено результати аналізу емпіричних даних про вибори Президента України у 2010 р. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: неоднорідний розподіл, ідентифікація, метод k -середніх, критерій Колмогорова–Смирнова.

Постановка проблеми та аналіз літератури. Генеральна сукупність, утворена об'єднанням двох чи більше однорідних вибірок є неоднорідною і зазвичай не може бути описана будь-яким однорідним законом розподілу.

Нехай $p_k \geq 0$, $\sum_k p_k = 1$, $F_k(x)$ – деякі функції розподілу. Функція розподілу неоднорідної випадкової величини є сумішшю функцій $F_k(x)$ з вагами p_k [1]

$$F(x) = \sum_k p_k F_k(x). \quad (1)$$

Постає питання розщеплення суміші розподілів на складові. Розв'язати цю задачу – означає за вибіркою класифікованих спостережень

$$X_1, X_2, \dots, X_n, \quad (2)$$

отриманих з неоднорідної генеральної сукупності типу (1), визначити кількість k компонентів суміші, вагові коефіцієнти p_1, p_2, \dots, p_k та параметри функції $F_k(x)$.

Задача ідентифікації неоднорідних розподілів випадкових величин часто виникає в прикладних задачах, пов'язаних з поділом або розщепленням сукупностей даних [2], наприклад, в задачах класифікації або розпізнавання образів. В статті О.К. Ісаєнка та В.Ю. Урбаха [3] розглядаються питання, пов'язані з розділенням сумішей розподілів ймовірностей на їх складові класичними методами та методами

кластерного аналізу. Різноманітні засоби вирішення задачі класифікації об'єктів наводяться в роботі С.А. Айвазяна [4]. Питання пов'язані зі статистичними критеріями перевірки адекватності моделей вирішуються в роботах О.І. Орлова [5, 6], Б.Ю. Лемешка [7], К.В. Воронцова [8] та інших науковців.

Мета статті. Розробка алгоритму ідентифікації моделей неоднорідного розподілу випадкових величин з використанням структурно-параметричного підходу.

Побудова математичної моделі. Ідентифікація закону розподілу випадкової величини полягає у виборі параметричної моделі закону розподілу ймовірностей, що найточніше відповідає результатам експериментальних спостережень [7].

Структурно-параметричний підхід до ідентифікації закону розподілу складається з двох етапів [9]:

1. На основі аналізу вибірових даних будують параметричну модель досліджуваного розподілу і роблять оцінки її параметрів.

2. За допомогою мінімізації розрахункових значень критеріїв Колмогорова–Смирнова або омега-квадрат уточнюють параметри моделі.

3. Перевіряють адекватність отриманої моделі за допомогою статистичних критеріїв.

Перший етап можна реалізувати за допомогою методу k -середніх кластерного аналізу, який було запропоновано Д. Хартиганом і М. Вонгом у 1978 році [5].

Алгоритм k -середніх передбачає виконання таких основних етапів [5, 10].

Етап 1. Формують k початкових центрів кластерів $y_1(1), y_2(1), \dots, y_k(1)$.

Етап 2. На n -му кроці ітерації множину об'єктів x поділяють на k кластерів за таким правилом:

$$x \in S_i(n), \text{ якщо } \|x - y_j(n)\| < \|x - y_i(n)\|$$

для всіх $i = 1, 2, \dots, k, i \neq j$, де $S_i(n)$ – множина об'єктів, що належать до кластера з центром $y_i(n)$, функцією відстані є евклідова метрика.

Етап 3. Визначають нові центри кластерів $y_j(n+1), j = 1, 2, \dots, k$, з умови, що:

$$J_j = \arg \min_{x \in S_j(n)} \|x - y_j(n+1)\|^2, j = 1, 2, \dots, k,$$

де J_j – показник якості мінімізації.

Центр $y_i(n+1)$ є вибіркоvim середнім на множині $S_j(n+1)$, тому нові центри кластерів визначають як

$$y_j(n+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j(n)} x, \quad j = 1, 2, \dots, k,$$

де N_j – кількість об'єктів вибірки, що належать до множини $S_j(n)$.

Етап 4. Умовою збіжності алгоритму є виконання рівності $y_j(n+1) = y_j(n)$ при $j = 1, 2, \dots, k$. Якщо ж ця умова не виконується, то необхідно повернутися до етапу 2.

Однією з головних проблем кластерного аналізу методом k -середніх є вибір початкової кількості кластерів. Для її вирішення можна використовувати ієрархічну класифікацію.

Після визначення кількості кластерів та їх статистичних характеристик уточнюють параметри моделі розподілу (1) шляхом мінімізації розрахункових значень критерію Колмогорова–Смирнова або омега-квадрат [6, 11].

На третьому етапі необхідно перевірити відповідність даних вибірки знайденої моделі розподілу. Для цього доцільно використовувати ті самі критерії, значення яких мінімізували на попередньому етапі.

Результати аналізу емпіричних даних. Для демонстрації роботи процедури ідентифікації моделей неоднорідних розподілів випадкових величин були використані результати голосування за кандидата В.Ф. Януковича на чергових виборах президента України від 17.01.2010 р. [12].

Вибірка складається з результатів голосування по 226 округам. Аналіз даних виконували за допомогою статистичних пакетів SPSS, Statistica [13, 14] та MS Excel. Були знайдені статистичні значення вибірки (табл.), побудовані гістограма та функція розподілу (рис. 1).

Таблиця

Статистичні показники результатів голосування

Обсяг вибірки	226	Стандартне відхилення	23,37
Розмах	81,08	Дисперсія	545,93
Мінімум	3,09	Асиметрія	0,406
Максимум	84,17	Ексцес	-1,14
Середнє значення	36,10	Коефіцієнт варіації	0,65

Виходячи з того, що коефіцієнт варіації більше ніж 0,5, а також з аналізу Р-Р графіків та гістограми, можна зробити висновок про неоднорідність досліджуваного розподілу.

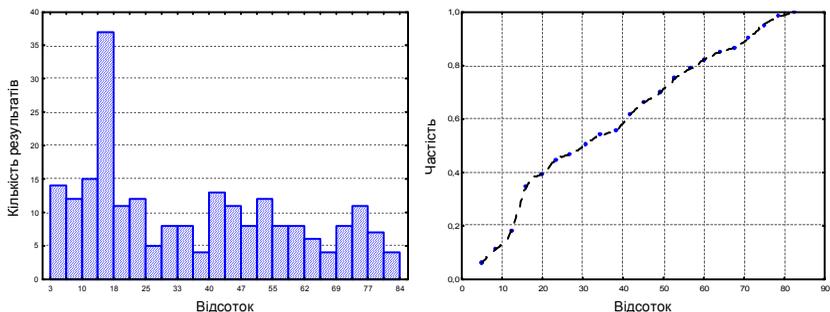


Рис. 1. Гістограма та емпірична функція розподілу результатів голосування

Перед тим, як перейти до методу k -середніх, необхідно визначити кількість однорідних компонент вибірки, тобто кластерів. Для цього необхідно побудувати дендрограму на основі вибірових значень (рис. 2).

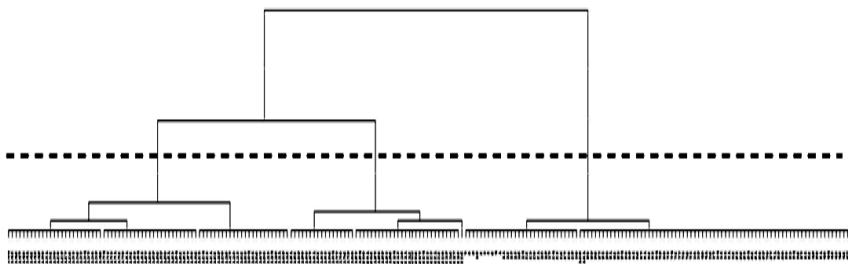


Рис. 2. Дендрограма розподілу результатів голосування

Поділивши дендрограму навпіл, отримаємо перетин з трьома групами значень. Отже кількість кластерів $k = 3$.

Далі здійснюємо процедуру кластеризації методом k -середніх. В результаті отримаємо 3 кластери, що складаються зі 107, 58 та 61 елементів. На основі аналізу Р-Р графіків та статистики Колмогорова-Смирнова, можна стверджувати, що найбільш придатним для опису кожної групи значень є нормальний розподіл з параметрами $N(14,90; 6,30)$, $N(43,79; 7,80)$, $N(70,31; 7,41)$. Якщо мінімізувати суму квадратів різниць значень емпіричних та теоретичних функцій розподілу для кожного кластера, отримаємо такі уточнення: $N(14,70; 6,23)$,

$N(47,62; 13,41)$, $N(75,09; 4,42)$. Вагові коефіцієнти дорівнюють: $p_1 = 0,45$, $p_2 = 0,42$, $p_3 = 0,13$. Таким чином, отримана модель розподілу результатів голосування є такою:

$$F_M = 0,45N(14,70; 6,23) + 0,42N(47,62; 13,41) + 0,13N(75,09; 4,42).$$

Розрахункове значення критерію Колмогорова–Смирнова дорівнює 0,41 і є меншим ніж критичне 0,895. Отже, можна вважати, що емпірична й теоретична функції розподілу відповідають одна одній на рівні значимості 0,05. Добра відповідність між емпіричною та теоретичною функціями розподілу також ілюструється рис. 3.

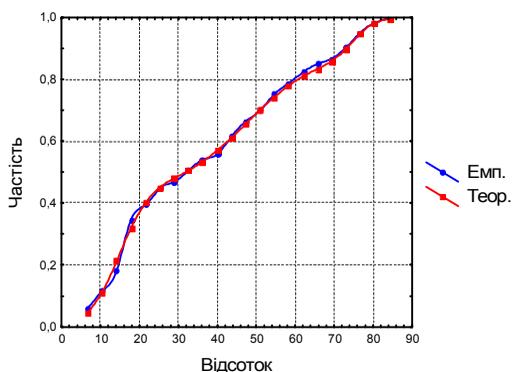


Рис. 3. Порівняння емпіричної та теоретичної функції розподілу результатів голосування

Висновки. Розроблено алгоритм ідентифікації моделей неоднорідного розподілу випадкових величин з використанням структурно-параметричного підходу. На першому етапі пропонується визначити кількість компонент та початкове наближення їх статистичних характеристик за допомогою методів кластерного аналізу. На другому етапі ідентифікації запропоновано уточнювати параметри моделі розподілу шляхом мінімізації розрахункових значень непараметричних критеріїв згоди (Колмогорова–Смирнова, омега-квадрат), а на третьому – перевіряти адекватність отриманої моделі за допомогою відповідних критеріїв. Результати обчислювальних експериментів підтверджують можливість використання запропонованого алгоритму.

Список літератури: 1. *Ивченко Г.И.* Введение в математическую статистику: Учебник / *Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев.* – М.: Издательство ЛКИ, 2010. – 600 с. 2. *Королев В.Ю.* Математические основы теории риска / *В.Ю. Королев, В.Е. Бенинг, С.Я. Шоргин.* – М.: Физматлит, 2007. – 544 с. 3. *Исаенко О.К.* Разделение смесей распределений вероятностей

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

на их составляющие / *О.К. Исаенко, В.Ю. Урбах* // Итоги науки и техники. Сев. ТВ. МС. ТК ВИНИТИ, 1976. – Т. 13. – С. 37 – 58. **4.** *Айвазян С.А.* Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. Справ. изд. / *С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, Е.С. Енюков*; Под ред. *С.А. Айвазяна*. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с. **5.** *Орлов А.И.* Математика случая: Вероятность и статистика – основные факты: Учебное пособие / *А.И. Орлов*. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 110 с. **6.** *Орлов А.И.* Прикладная статистика / *А.И. Орлов* – М.: Экзамен, 2006. – 671 с. **7.** *Лемешко Б.Ю.* О задаче идентификации закона распределения случайной составляющей погрешности измерений / *Б.Ю. Лемешко* // Метрология. – 2004. – № 7. – С. 8 – 18. **8.** *Воронцов К.В.* Качество восстановления зависимостей по эмпирическим данным / *К.В. Воронцов* // Математические методы распознавания образов: 7-ая Всерос. конф. Тезисы докл. – Пушино, 1995. – С. 24 – 26. **9.** *Бахрушин В.Е.* Проблемы идентификации моделей распределения случайных величин с применением современного программного обеспечения / *В.Е. Бахрушин* // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 50 – 54. **10.** *Ту Дж.* Принципы распознавания образов / *Дж. Ту, Р. Гонсалес*. – М.: Мир, 1978. – 414 с. **11.** *Бахрушин В.Е.* Методи аналізу даних / *В.Е. Бахрушин*. – Запоріжжя: КПУ, 2011. – 268 с. **12.** Основні статистичні відомості виборчого процесу 2010 року з чергових виборів Президента України // Вісник Центральної виборчої комісії. – 2010. – № 1. – С. 12 – 15. **13.** *Бююль А.* SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / *Ахим Бююль, Петер Цёфель*. – СПб.: ООО "ДиСофтЮП", 2005. – 608 с. **14.** *Халафян А.А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник / *А.А. Халафян*. – М.: ООО "Бином-Пресс", 2007. – 512 с.

УДК 519.25

Использование метода k -средних для идентификации моделей неоднородных распределений случайных величин / Дудко И.А., Бахрушин В.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – №. 62 (968). – С. 64 – 69.

В статье рассмотрена проблема идентификации моделей неоднородных распределений случайных величин. Предложена процедура, которая предусматривает предварительное оценивание количества и параметров составляющих и их дальнейшее уточнение методами минимизации расчетных значений критерия Колмогорова–Смирнова или критерия типа омега-квадрат. Приведены результаты анализа эмпирических данных о выборах Президента Украины в 2010 г. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: неоднородное распределение, идентификация, метод k -средних, критерий Колмогорова–Смирнова.

UDC 519.25

Using of the k -means method for identification of inhomogeneous distributions models of random variables / Dudko I.O., Bakhrushin V.E. / Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 64 – 69.

In the article the problem of identification of inhomogeneous distribution models of random variables is considered. The procedure, which provides a preliminary estimation of the quantity and parameters of components and their further improvement with the help of methods of minimization of the Kolmogorov–Smirnov test or the omega-squared test calculated values, is proposed. The results of analysis of empirical data about the elections of the President of Ukraine in 2010 year. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs: 14 titles.

Keywords: inhomogeneous distribution, identification, k -means method, the Kolmogorov–Smirnov test.

Надійшла до редакції 02.08.2012

Д.Б. ЕЛЬЧАНИНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков,
К.Е. БАЙДА, преподаватель-стажер, НТУ "ХПИ", Харьков

ВЕРБАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Предложены количественные и качественные критерии сравнения моделей бизнес-процессов, построенных по методологии IDEF0. Рассмотрены основные этапы вербального анализа таких моделей (порядковая классификация, упорядочение, парное сравнение) и их ранжирование вербально-количественным методом аналитической иерархии. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: бизнес-процессы, IDEF0, вербальный анализ, аналитическая иерархия.

Постановка проблемы. Финансовые цели и показатели были, есть и будут основной количественной характеристикой бизнеса. Но в современной парадигме они – всего лишь следствие таких качественных целей и показателей как "удовлетворение клиента", "внутренние процессы", "обучение и развитие персонала". А эти, в свою очередь, определяются вербальными описаниями стратегии бизнеса и видением будущего его развития, которые зависят от таких философских понятий как "ценности" и "миссия" бизнеса [1]. Информационно-аналитическое обеспечение бизнеса должно поддерживать обработку не только его количественных, но и качественных характеристик. Эта проблема связана с научной задачей развития теории устойчивого развития социальных систем и практической задачей внедрения вербальных методов в системы моделирования, анализа и управления бизнес-процессами.

Анализ литературы. Оптимизация бизнес-процессов связана с использованием таких критериев как снижение издержек, уменьшение времени выполнения процессов, повышение их качества и уменьшение рисков [2]. Особое внимание уделяют критериям оценки полноты и непротиворечивости данных для представления бизнес-процессов, ориентированных на знания [3]. В связи с тем, что показатели бизнес-процессов становятся все менее формализованными, средства бизнес-аналитики сегодня являются фактически системами поддержки принятия решений, поддерживающих вербальные критерии экспертов в той или иной области бизнеса [4]. Например, построение моделей бизнес-процессов с использованием генетических алгоритмов (ГА) [5 – 7] связано со сравнением моделей как в процессе работы ГА при выполнении операторов отбора и редукции, так и при выборе

окончательного решения из нескольких вариантов, полученных в результате работы ГА.

Цель статьи. Адаптация вербальных методов к анализу моделей бизнес-процессов.

Критерии оценки моделей бизнес-процессов. Сравнение моделей методами вербального анализа [8] начинается с извлечения из эксперта критериев оценки, их значений и шкал. Пусть модель некоторого бизнес-процесса P , построенная по методологии IDEF0, и его декомпозиции на процессы P_1 и P_2 имеет следующий вид (рис. 1).

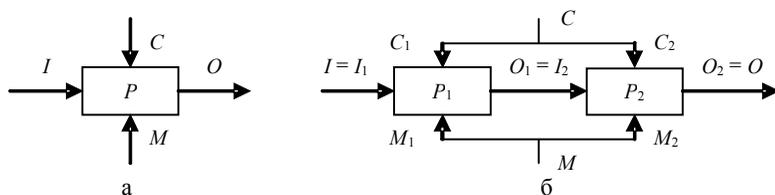


Рис. 1. Диаграммы модели: а – контекстная; б – декомпозиция контекстной

Финансовым критерием оценки является функция V стоимости процесса P . Чем меньше это значение, тем лучше. $V(P) = V(P_1) + V(P_2)$.

Клиентскими критериями оценки могут быть качество сырья I на входе процесса P , экологическая чистота конечного продукта O и степень соответствия управления C отраслевым стандартам (а также их значений на диаграмме декомпозиции, например, I_1, I_2, O_1, O_2, C_1 и C_2 на рис. 1, б).

Внутренние процессы оцениваются количеством связей и процессов на диаграммах декомпозиции (чем меньше, тем лучше).

Критерием оценки персонала M (M_1, M_2) является его квалификация, а также степень износа используемого оборудования.

Любой критерий K имеет множество значений $K = \{k_1, \dots, k_m, \dots, k_M\}$ и соответствующую шкалу их упорядочения (рис. 2).

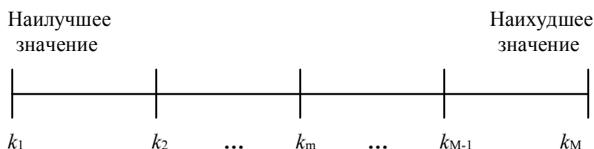


Рис. 2. Шкала значений критерия K

Модель характеризуется вектором $a = (a_1, \dots, a_n, \dots, a_N)$, где $a_n \in K_n$ – множество значений n -го критерия. Из двух моделей лучше та, которая характеризуется не худшими значениями по всем критериям, но хотя бы по одному критерию строго лучше.

Порядковая классификация моделей бизнес-процессов. Если модели несравнимы (первая характеризуется лучшим значением по одному критерию, а вторая – по другому), то из эксперта необходимо извлекать дополнительную информацию. В вербальных методах – это информация о классах, к которым может принадлежать модель. Задача распределения всех гипотетически возможных моделей по классам имеет большую размерность. Для ускорения построения полной классификации и контроля непротиворечивости эксперта используется принцип "лучшая модель не должна попасть в худший класс" и алгоритм, позволяющий предъявить эксперту для классификации небольшое количество моделей. Полученная классификация применяется для сравнения моделей: лучше та, которая принадлежит лучшему классу. Например, на рис. 3 модель, характеризующаяся вектором a лучше, чем та, которой соответствует вектор b .

Отличные модели	Хорошие a	Удовлетворительные b	Плохие модели
-----------------	----------------	---------------------------	---------------

Рис. 3. Разбиение моделей на четыре класса

Упорядочение моделей бизнес-процессов. Несравнимые модели одного класса можно сравнить, если извлечь из эксперта информацию о важности критериев и их значений. Для этого используется алгоритм построения единой порядковой шкалы (ЕПШ), представляющей собой объединение шкал критериев. В процессе создания ЕПШ осуществляется контроль непротиворечивости эксперта. Полученная ЕПШ применяется для сравнения моделей: лучше та, у которой лучшие значения критериев относительно ЕПШ.

Пусть, например, ЕПШ имеет такой вид, как на рис. 4.

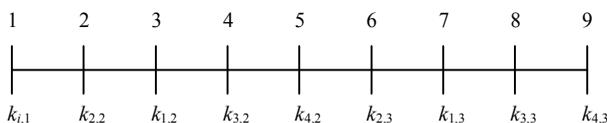


Рис. 4. Единая порядковая шкала четырех критериев

Пусть одна модель характеризуется вектором $(k_{1,2}, k_{2,2}, k_{3,1}, k_{4,1})$, а другая – вектором $(k_{1,1}, k_{2,2}, k_{3,2}, k_{4,2})$. Эти модели несравнимы, т.к. первая имеет лучшие значения по последним двум критериям, а вторая – по первому критерию. В терминах ЕПШ первая модель характеризуется вектором $(3, 2, 1, 1)$, а вторая – $(1, 2, 4, 5)$. Следовательно, первая модель лучше второй, т.к. имеет лучший набор значений относительно ЕПШ.

Парное сравнение моделей бизнес-процессов. При использовании ЕПШ могут остаться несравнимые модели. Для их сравнения из эксперта необходимо извлечь информацию о том, насколько реальные модели могут отличаться от идеальной модели. Для этого используется алгоритм компенсации недостатков. Лучшей считается модель, имеющая меньше недостатков относительно других моделей.

Пусть, например, необходимо сравнить две модели, одна из которых представлена вектором $(k_{1,2}, k_{2,2}, k_{3,1}, k_{4,3}, k_{5,2}, k_{6,5}, k_{7,1})$, а другая – вектором $(k_{1,3}, k_{2,1}, k_{3,3}, k_{4,2}, k_{5,4}, k_{6,3}, k_{7,2})$. Недостатками первой модели относительно второй являются значения по второму, четвертому и шестому критериям, т.к. по ним первая модель хуже, чем вторая. По аналогичной причине относительными недостатками второй модели являются значения по первому, третьему, пятому и седьмому критериям. В этом случае идеалом является модель $(k_{1,2}, k_{2,1}, k_{3,1}, k_{4,2}, k_{5,2}, k_{6,3}, k_{7,1})$, включающая достоинства обеих моделей. Пусть эксперт считает самым существенным недостатком первой модели значение $k_{4,3}$, вторым – значение $k_{2,2}$, последним – $k_{6,5}$, а для второй модели: самым существенным – значение $k_{1,3}$, вторым – $k_{5,4}$, третьим – $k_{7,2}$, последним – $k_{3,3}$. Если $k_{4,3}$ компенсируется $k_{1,3}$, $k_{2,2} - k_{5,4}$ и $k_{7,2}$, а $k_{6,5} - k_{3,3}$, то первая модель лучше, чем вторая.

Ранжирование моделей бизнес-процессов. Не всегда недостатки одной модели компенсируются достоинствами другой. В этом случае можно использовать "вербально-количественный" метод аналитической иерархии [9], использующий шкалу, переводящую словесные оценки альтернатив и критериев в количественные показатели (рис. 5).

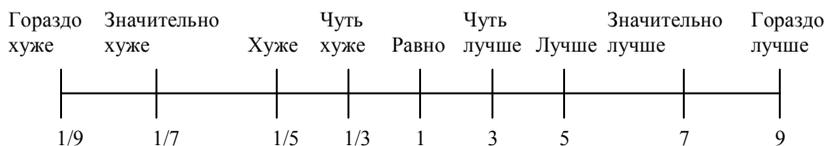


Рис. 5. Шкала относительной важности

Пусть одна модель чуть лучше другой по одному критерию, но чуть хуже – по другому. А первый критерий – чуть важнее второго. Эти

вербальные описания переводятся в матричные, согласно которым вес первой модели относительно первого критерия $W_{1,1} = 0,75$, относительно второго – $W_{1,2} = 0,25$; для второй модели $W_{2,1} = 0,25$ и $W_{2,2} = 0,75$; первый критерий имеет вес $Q_1 = 0,75$, второй – $Q_2 = 0,25$.

Вес первой модели $W_1 = W_{1,1} \times Q_1 + W_{1,2} \times Q_2 = 0,625$.

Вес второй модели $W_2 = W_{2,1} \times Q_1 + W_{2,2} \times Q_2 = 0,375$.

Следовательно, первая модель лучше, чем вторая.

Проект подсистемы вербального анализа моделей бизнес-процессов. Актер – бизнес-аналитик. Прецеденты описаны в таблице.

Таблица

Сравнение моделей бизнес-процессов

Название	Описание
Работа с критериями	Ввод, сохранение и редактирование количественных и качественных критериев сравнения моделей бизнес-процессов (название критерия, его значения и шкала).
Порядковая классификация	Ввод, сохранение и редактирование классов моделей бизнес-процессов (название и порядок). Построение классификации в режиме диалога с аналитиком.
Упорядочение	Построение единой порядковой шкалы (ЕПШ) в режиме диалога с аналитиком. Упорядочение моделей бизнес-процессов с использованием ЕПШ.
Парное сравнение	Сравнение пары моделей бизнес-процессов путем компенсации недостатков в режиме диалога с аналитиком.
Аналитико-иерархический процесс	Сравнение моделей бизнес-процессов относительно критериев и выявление важности критериев с использованием универсальной шкалы в режиме диалога с аналитиком. Вычисление лучшей модели бизнес-процесса.

Выводы. Предложены количественные и качественные критерии сравнения моделей бизнес-процессов. Рассмотрены основные этапы вербального анализа таких моделей (классификация, упорядочение, парное сравнение) и их ранжирование методом аналитической иерархии. Перспективным является исследование особенностей реализации предложенного подхода в рамках построения моделей бизнес-процессов с использованием ГА.

Список литературы: 1. *Каплан Р.* Награда за блестящую реализацию стратегии: связь стратегии и операционной деятельности – гарантия конкурентного преимущества / *Р. Каплан, Д. Нортон.* – М.: Олимп-Бизнес, 2010. – 341 с. 2. *Блинов А.О.* Системное управление проведения реинжиниринга бизнес-процессов организации / *А.О. Блинов, О.С. Рудакова* // Вісник Донецького національного університету. Серія В: Економіка і право. – 2011. – Спецвипуск. – Т. 2. – С. 14 – 20. 3. *Левыкин В.М.* Оценивание полноты и **ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)**

непротиворечивости данных для знание-ориентированного представления бизнес-процессов / В.М. Левыкин, С.Ф. Чалый // Бионика интеллекта. – 2008. – № 2 (69). – С. 115 – 119.

4. СППР бизнес-аналитика / М.Э. Куссуль, А.С. Сычев, Е.Г. Садовая, А.О. Антоненко // Математичні машини і системи. – 2010. – № 3. – С. 96 – 103.

5. Сльчанінов Д.Б. Дослідження та проектування інформаційно-аналітичних систем моделювання бізнес-процесів / Д.Б. Сльчанінов, К.Є. Байда // Проблеми інформатики і моделювання: Тезиси 11-ої міжнародної науково-технічної конференції. Секція "Молоді вчені". – Харків: НТУ "ХПИ", 2011. – С. 25.

6. Байда К.Є. Автоматизація функціонального моделювання бізнес-процесів на основі генетичних алгоритмів / К.Є. Байда // 16-й Міжнародний молодіжний форум "Радиоелектроника и молодежь в XXI веке". Сб. матеріалів форуму. – Т. 8. Міжнародна конференція "Управление знаниями и конкурентная разведка". – Харків: ХНУРЕ, 2012. – С. 119 – 120.

7. Байда К.Е. Адаптація генетических алгоритмов к автоматизации моделирования бизнес-процессов / К.Е. Байда, Д.Б. Эльчанинов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. IV (15-17 травня 2012 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянского Л.Л. – Харків: НТУ "ХПИ", 2012. – С. 6.

8. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев. – М.: Наука, 2006. – 181 с.

9. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process / T.L. Saaty // Int. J. Services Sciences. – 2008. – Vol. 1. – № 1. – P. 83 – 98.

Статью представил д.т.н., проф. НТУ "ХПИ" Луников В.С.

УДК 004.9

Вербальний аналіз моделей бізнес-процесів / Сльчанінов Д.Б., Байда К.Є. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 70 – 75.

Запропоновано кількісні та якісні критерії порівняння моделей бізнес-процесів, побудованих за методологією IDEF0. Розглянуто основні етапи вербального аналізу таких моделей (порядкова класифікація, упорядкування, парне порівняння) та їх ранжування вербально-кількісним методом аналітичної ієрархії. Іл.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: бізнес-процеси, IDEF0, вербальний аналіз, аналітична ієрархія.

UDC 004.9

Verbal analysis of business-processes models / Elchaninov D.B., Baida K.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 70 – 75.

Quantitative and qualitative criteria of comparison of business processes models constructed on IDEF0 methodology are proposed. The main stages of the verbal analysis of such models (order classification, ordering, pair comparison) and their ranking by a verbal-quantitative method of analytical hierarchy are considered. Figs.: 5. Tabs.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: business-processes, IDEF0, verbal analysis, analytical hierarchy.

Поступила в редакцію 25.08.2012

УДК 799.322.2:623.446.4

И.Ф. ЗАНЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф., Технический университет им. К. Пулаского, Радом, Польша

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СТРЕЛОК-ЛУК

Методом Лагранжа создана математическая модель взаимодействия стрелка с луком в форме системы девяти дифференциальных уравнений и начальных условий. Соответствующая задача Коши решена методом Рунге-Кутты с применением программы NDSolve из пакета Mathematica. Модель показала пригодность для изучения основных параметров системы стрелок-лук. Ил.: 3. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: математическая модель, стрелок, лук, задача Коши, Mathematica.

Постановка проблемы. Аналитические исследования процесса совместного движения стрелы и лука проводились в предположении о неподвижности точки контакта рукоятки лука и руки стрелка [1 – 4]. Таким образом, тело стрелка не принималось в расчёт, хотя по экспериментальным данным удерживающая лук рука вместе с рукояткой лука во время ускоренного движения стрелы с тетивой не остаются неподвижными [5 – 7].

Анализ литературы. В [1] описана компьютерная модель внутренней баллистики современного спортивного лука. В [8] была предложена модель согласования параметров спортивного лука с параметрами тела стрелка в статической постановке задачи. В [9] рассмотрена проблема стабилизации положения лука в вертикальной плоскости. В [10] представлена модель вибрационных процессов, сопровождающих выстрел из лука. В [11] изложены результаты моделирования совместного перемещения стрелы, тетивы и лука. В [12] с помощью оптоэлектронной системы зафиксированы движения рукоятки лука и руки стрелка. В то же время, практически пригодной модели для изучения процессов взаимодействия тела спортсмена с луком пока не создано.

Цель статьи – разработать компьютерную модель взаимодействия стрелка с луком во время совместного движения стрелы и тетивы.

Механико-математическая модель системы. Кинетическая T_{archer} и потенциальная P_{archer} энергия тела стрелка, а также диссипативная функция Релея Φ_{archer} при взаимодействии с луком во время совместного движения стрелы с тетивой представлены выражениями (рис. 1 а – в):

$$\begin{aligned}
T_{archer} &= \frac{1}{2} (m_{1\xi} \xi_s'^2 + m_{2\xi} \xi_H'^2 + m_\eta \eta_H'^2); \\
P_{archer} &= \frac{1}{2} [c_{1\xi} \xi_s^2 + c_{2\xi} (\xi_s - \xi_H)^2 + c_\eta \eta_H^2]; \\
\Phi_{archer} &= \frac{1}{2} [k_{1\xi} \xi_s'^2 + k_{2\xi} (\xi_s' - \xi_H')^2 + k_\eta \eta_H'^2],
\end{aligned} \tag{1}$$

в которых чёрточкой обозначена производная по времени $(\dot{}) \equiv d/dt$.

Кинетическая энергия рукоятки, стабилизатора и прицела представлена выражением (рис. 1 з, д):

$$T_{handle} = \frac{1}{2} \int_{m_h} (\xi_h'^2 + \eta_h'^2) dm_h, \tag{2}$$

где $\xi_h = \xi_H + y + x\kappa$; $\eta_h = \eta_H + x - u\kappa$; κ – угловое перемещение рукоятки относительно точки контакта с рукою стрелка H ; Hxy – прямоугольная система координат, привязанная к рукоятке лука.

Выражение кинетической энергии плеч (3):

$$T_l = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &(m_U + m_L) (\xi_H'^2 + \eta_H'^2) + (m_U h_U^2 + m_L h_L^2) \kappa'^2 + \\ &+ I_U (\theta'_U + \kappa')^2 + I_L (\theta'_L - \kappa')^2 + 2(m_U r_U - m_L r_L) \xi'_H \kappa' + \\ &+ 2\kappa' \left[\begin{aligned} &m_U r_U h_U (\theta'_U + \kappa') \cos(\theta_U + \kappa) - \\ &- m_L r_L h_L (\theta'_L - \kappa') \cos(\theta_L - \kappa) \end{aligned} \right] + \\ &+ 2\xi'_H \left[\begin{aligned} &m_U r_U (\theta'_U + \kappa') \cos(\theta_U + \kappa) + \\ &+ m_L r_L (\theta'_L - \kappa') \cos(\theta_L - \kappa) \end{aligned} \right] - \\ &- 2\eta'_H \left[\begin{aligned} &m_U r_U (\theta'_U + \kappa') \sin(\theta_U + \kappa) - \\ &- m_L r_L (\theta'_L - \kappa') \sin(\theta_L - \kappa) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}, \tag{3}$$

где $m_{U/L}$ – масса плеч; $I_{U/L}$ – моменты инерции плеч относительно осей крепления к рукоятке (точки $H_{U/L}$); $r_{U/L}$ – расстояния от точек $H_{U/L}$ до центров масс плеч.

Выражения потенциальной энергии плеча и стрелы [17]:

$$P_{U/L} = \frac{1}{2} c_{U/L} (\theta_{U/L} + \varphi_{U/L})^2; P_{s(U/L)} = \frac{f(s_{U/L} - s_{U/L}^*)^2}{2s_{U/L}^*}, \tag{4}$$

где; c_U, c_L – жёсткость плеч.

Выражения кинетической и потенциальной энергии стрелы:

$$T_{string} = \frac{1}{2} \frac{m_s}{3} \left[\xi_A'^2 + \eta_A'^2 + \frac{2s_U^*}{s^*} (\xi_{TU}'^2 + \eta_{TU}'^2) + \frac{2s_L^*}{s^*} (\xi_{TL}'^2 + \eta_{TL}'^2) \right], \quad (5)$$

где m_s – масса тетивы; $s_{U/L}, s_{U/L}^*$ – длина ветви тетивы в растянутом и нерастянутом состоянии; f – распределённая жёсткость тетивы.

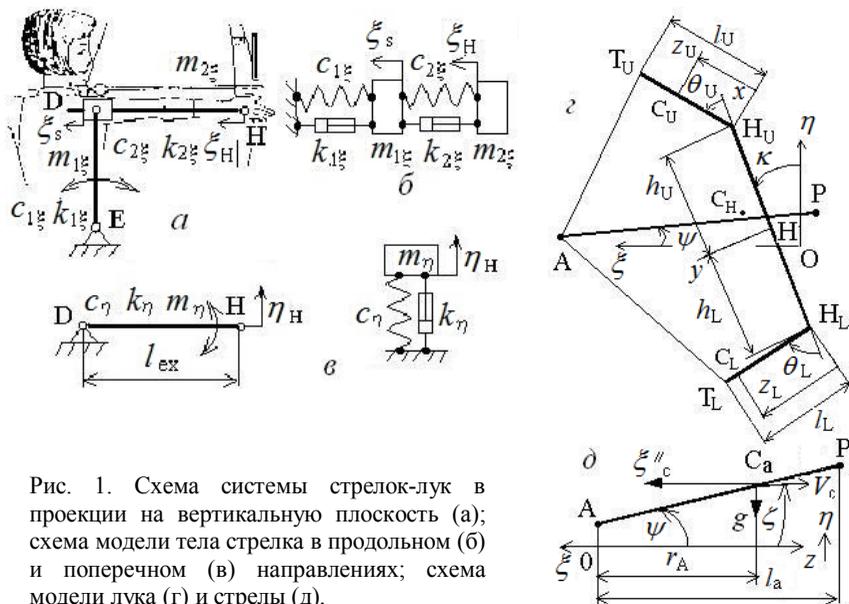


Рис. 1. Схема системы стрелок-лук в проекции на вертикальную плоскость (а); схема модели тела стрелка в продольном (б) и поперечном (в) направлениях; схема модели лука (г) и стрелы (д).

Выражение кинетической и потенциальной энергии стрелы [11]:

$$T_{arrow} = \frac{1}{2} \int_0^{l_a} \mu_a(z_a) (\xi_a'^2 + \eta_a'^2) dz_a + \frac{1}{2} m_P [\xi_a'^2 + \eta_a'^2]_{z_a=l_a}; \quad (6)$$

$$P_{arrow} = m_a r_A \left[\frac{1}{2} \xi_A'' (\psi^2 - \psi_0^2) + g(\psi - \psi_0) \right],$$

где l_a – длина стрелы; μ_a – распределённая масса древка стрелы; z_a – привязанная к стреле продольная координата; m_p – масса наконечника; ψ_0 – начальный угол подъёма стрелы.

Подстановкой выражений (1) – (6) в уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q'_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q'_i} = 0,$$

была получена система дифференциальных уравнений второго порядка относительно обобщённых координат $q_i \equiv \xi_s, \xi_H, \eta_H, \kappa, \theta_U, \theta_L, \xi_A, \eta_A, \psi$, $i = \overline{1, 9}$.

Решение соответствующей задачи Коши при начальных условиях [12] было получено методом Рунге-Кутты с помощью программы NDSolve из пакета Mathematica.

Программа NDSolve (Mathematica)

```

ξλ0 = 0.7576; ηλ0 = 0.0426237; θU0 = 0.765512; θL0 = 0.794188; mλ = 0.0023;
mU = 0.107; mL = 0.107; mH = 2.13; rU = 0.228; rL = 0.228; lU = 0.531;
lL = 0.531; hU = 0.342; hL = 0.342; SU = 0.780; SL = 0.840; v = 25515;
IU = 0.00682; IL = 0.00682; IH = 0.213; cU = 69.1; cL = 69.1; φU = 0.604672;
φL = 0.607552; IA = 0.00736; ma = 0.0224; rA = 0.5103; la = 0.783;
ηp0 = 0.0426237; g = 9.81; xCH = -0.021; yCH = -0.034; m1ξ = 26; m2ξ = 3.8;
mη = 2.1; c1ξ = 11600; c2ξ = 1900; cη = 943; k1ξ = 237; k2ξ = 78; kη = 45;
ψ0 = (ηp0 - ηλ0) / la; ζ = -ArcTan[(ηA'[t] + rA*ψ'[t]) / ξA'[t]];
sU = √(SUη2 + SUξ2); sL = √(SLη2 + SLξ2); eU =  $\frac{v * (s_U - S_U)}{s_U * S_U}$ ; eL =  $\frac{v * (s_L - S_L)}{s_L * S_L}$ ;
SUη = ηH[t] + hU + lU*b1 - ηA[t]; SUξ = ξH[t] + hU*x[t] + lU*b2 - ξA[t];
SLη = ηH[t] - hL - lL*b3 - ηA[t]; SLξ = ξH[t] - hL*x[t] + lL*b4 - ξA[t];
b1 = Cos[x[t] + θU[t]]; b2 = Sin[x[t] + θU[t]];
b3 = Cos[-x[t] + θL[t]]; b4 = Sin[-x[t] + θL[t]];
system = {m1ξ*ξs''[t] + c1ξ*ξs[t] + k1ξ*ξs'[t] - c2ξ* (ξH[t] - ξs[t]) -
k2ξ* (ξH'[t] - ξs'[t]) == 0,
(mH + mU + mL + m2ξ) * ξH''[t] + c2ξ* (ξH[t] - ξs[t]) + k2ξ* (ξH'[t] - ξs'[t]) +
(mH*xCH + mU*hU - mL*hL) * x''[t] + mU*rU* (b1* (θU''[t] + x''[t]) -
b2* (θU'[t] + x'[t])2) + mL*rL* (b3* (θL''[t] - x''[t]) -
b4* (θL'[t] - x'[t])2) + eU*SUξ + eL*SLξ == 0,

```

$$\begin{aligned}
& (m_H + m_U + m_L + m_\eta) * \eta_H''[t] + c_\eta * \eta_H[t] + k_\eta * \eta_H'[t] - m_H * y_{CH} * x''[t] - \\
& m_U * r_U * (b_2 * (\theta_U''[t] + x''[t]) + b_1 * (\theta_U'[t] + x'[t])^2) + \\
& m_L * r_L * (b_4 * (\theta_L''[t] - x''[t]) + b_3 * (\theta_L'[t] - x'[t])^2) \\
& + e_U * S_{U\eta} + e_L * S_{L\eta} == 0, (m_A + m_a) * \xi_A''[t] - e_U * S_{U\xi} - e_L * S_{L\xi} == 0, \\
& (m_A + m_a) * \eta_A''[t] + m_a * r_A * \psi''[t] + m_a * g - e_U * S_{U\eta} - e_L * S_{L\eta} == 0, \\
& I_A * \psi''[t] + m_a * r_A * (\xi_A''[t] * \psi[t] + g + \eta_A''[t]) == 0, \\
& I_U * (\theta_U''[t] + x''[t]) + m_U * r_U * h_U * b_1 * x''[t] + m_U * r_U * (b_1 * \xi_H''[t] \\
& - b_2 * \eta_H''[t]) + c_U * (\theta_U[t] + \varphi_U) + e_U * l_U * (S_{U\xi} * b_1 - S_{U\eta} * b_2) == 0, \\
& I_L * (\theta_L''[t] - x''[t]) - m_L * r_L * h_L * b_3 * x''[t] + m_L * r_L * (b_3 * \xi_H''[t] + \\
& b_4 * \eta_H''[t]) + c_L * (\theta_L[t] + \varphi_L) + e_L * l_L * (S_{L\xi} * b_3 + S_{L\eta} * b_4) == 0, \\
& (I_H + I_U + I_L + m_U * h_U^2 + m_L * h_L^2) * x''[t] + I_U * \theta_U''[t] - I_L * \theta_L''[t] + \\
& m_U * r_U * h_U * (b_1 * (\theta_U''[t] + 2 * x''[t]) - b_2 * (\theta_U'[t] + x'[t])^2) - \\
& m_L * r_L * h_L * (b_3 * (\theta_L''[t] - 2 * x''[t]) - b_4 * (\theta_L'[t] - x'[t])^2) + \\
& (m_H * x_{CH} + m_U * (h_U + b_1 * r_U) - m_L * (h_L + b_3 * r_L)) * \xi_H''[t] - \\
& e_U * (S_{U\xi} * (l_U * b_1 + h_U) - S_{U\eta} * l_U * b_2) - \\
& e_L * (S_{L\xi} * (l_L * b_3 + h_L) + S_{L\eta} * l_L * b_4) == 0, \\
& \xi_A[0] == \xi_{A0}, \eta_A[0] == \eta_{A0}, \xi_s[0] == 0, \xi_H[0] == 0, \eta_H[0] == 0, \theta_L[0] == \theta_{L0}, \\
& \theta_U[0] == \theta_{U0}, \psi[0] == \psi_0, \psi'[0] == 0, x[0] == 0, \xi_A'[0] == 0, \eta_A'[0] == 0, \\
& \xi_s'[0] == 0, \xi_H'[0] == 0, \eta_H'[0] == 0, \theta_L'[0] == 0, \theta_U'[0] == 0, x'[0] == 0; \\
& t_0 = 0; t_1 = 0.01579; \\
& \text{solution} = \text{NDSolve}[\text{system}, \{\xi_s, \xi_H, \eta_H, \xi_A, \eta_A, \psi, \theta_L, \theta_U, x\}, \\
& \{t, t_0, t_1\}, \text{Method} \rightarrow \text{ExplicitRungeKutta}]
\end{aligned}$$

Результаты моделирования для современного спортивного лука, соответствующего стандарту FITA (Международной федерации стрельбы из лука), представлены в графической форме (рис. 2, 3).

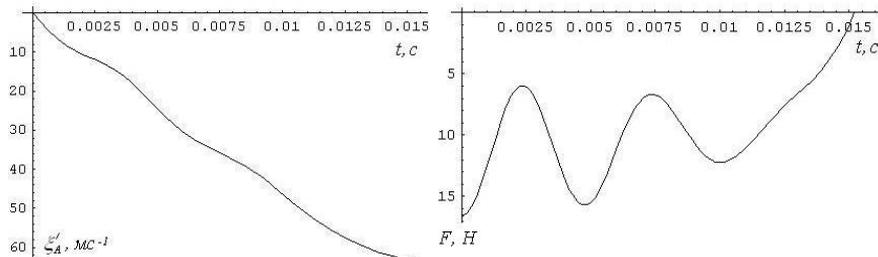


Рис. 2. Продольная скорость стрелы лука и сила отдачи лука.

Сила отдачи рукоятки лука по величине невелика и составляет приблизительно 3% от величины силы полного растяжения лука. Сила отдачи передаётся через тело стрелка на опору, уменьшаясь вследствие амортизации приблизительно в 20 раз. Величины соответствующих перемещений верхней части туловища стрелка находятся в пределах одного миллиметра.

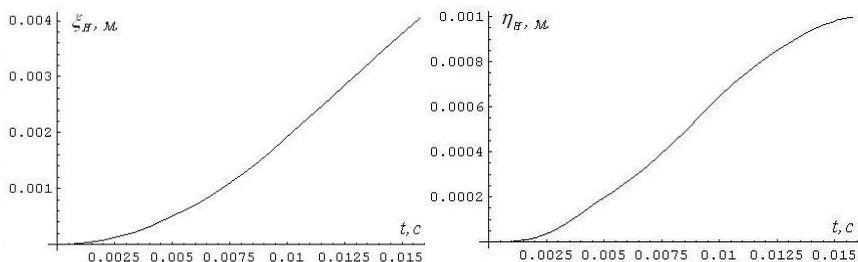


Рис. 3. Продольная и поперечная координаты рукоятки лука и руки стрелка.

Выводы. Результаты моделирования системы стрелок-лук хорошо коррелируют с экспериментальными данными [6, 12], в частности, относительно существенной нелинейности характера процесса совместного движения стрелы с тетивой.

Список литературы: 1. *Заневский И.Ф.* Компьютерная модель внутренней баллистики стрелы лука / *И.Ф. Заневский* // Вестник НТУ "ХПИ". Серия "Информатика и моделирование". – 2011. – № 36. – С. 78–86. 2. *Zanevskyy I.* Recoil and vibration in an archery bow equipped with a multi-rod stabilizer / *I. Zanevskyy*. – Shock and Vibration. – 2012. – Vol. 19. – № 2. – P. 231–246. 3. *Pekalski R.* Modelling and simulation research of the competitor-bow-arrow system: Unpublished doctoral dissertation / *R. Pekalski*. – Warszawa: AWF, 1987. 4. *Zanevskyy I.* Mathematical and computer model of sport archery bow and arrow interaction / *I. Zanevskyy* // International Journal of Computer Science in Sport. – 2011. – Vol. 10. – № 2. – P. 33–42. 5. *Kooi B.W.* Bow-arrow interaction in archery / *B.W. Kooi* // Journal of Sports Sciences. – 1998. – № 16. – P. 721–731. 6. *Ohsima S.* Simulation of the shape and dynamics of Japanese bow – Application of large deflection theory / *S. Ohsima, A. Ohtsuki* / The Book of the 4th International Conference on Engineering of Sport, Kioto. – 2002. – P. 102–107. 7. *Park J.L.* Compound-archery-bow nocking-point locus in the vertical plane / *J.L. Park* // Proc. IMechE, Part P // Journal of Sports Engineering and Technology. – 2009. – Vol. 224. – № 4. – P. 141–153. 8. *Zanevskyy I.* Bow tuning in the vertical plane / *I. Zanevskyy* // Sports Engineering. – 2006. – Vol. 9. – № 4. – P. 77–86. 9. *Zanevskyy I.* Modeling and computer simulation of bow stabilization in the vertical plane / *I. Zanevskyy* // International Journal of Sports Science and Engineering. – 2008. – Vol. 2. – № 1. – P. 3–14. 10. *Zanevskyy I.* Modeling of the archery bow and arrow vibrations / *I. Zanevskyy* // Shock and Vibration. – 2009. – Vol. 16. – № 4. – P. 203–212. 11. *Zanevskyy I.* Archer-bow-arrow behaviour in the vertical plane / *I. Zanevskyy* // Acta of Bioengineering and Biomechanics. – 2008. – Vol. 8. – № 1. – P. 65–82. 12. *Edelmann-Nusser J.* Motion of the bow during aiming and releasing the shot / *J. Edelmann-Nusser, M. Gruber, A. Gollhofer* / Conference Proceedings Archive, 19 International Symposium on Biomechanics in Sports, University of San Francisco. – 2001. – P. 162–165.

УДК 799.322.2:623.446.4

Комп'ютерна модель системи стрілець-лук / Заневський І.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 76 – 82.

Методом Лагранжа створено математичну модель взаємодії стрільця з луком у формі системи де'яти диференціальних рівнянь і початкових умов. Відповідну задачу Коші розв'язано методом Рунге-Кутта із застосуванням програми NDSolve з пакету Mathematica. Модель показала придатність для вивчення основних параметрів системи стрілець-лук. Іл.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: математична модель, стрілець, лук, задача Коші, Mathematica.

UDC 799.322.2:623.446.4

Computer model of the archer and bow system / Zanevskyy I.P. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 76 – 82.

A mathematical model of the archer and bow interaction was created using Lagrange method as a system of nine differential equations and initial conditions. Corresponding Cauchy problem was solved using Runge-Kutta method and NDSolve programs from Mathematica package. The model showed its possibility for studying of the main parameters of the archer and bow system. Figs.: 3. Refs.: 12 titles.

Keywords: mathematical model, archer, bow, Cauchy problem, Mathematica.

Поступила в редакцію 08.07.2012

В.Г. ИВАНОВ, д-р. техн. наук, проф., НУ "ЮАУ им. Я. Мудрого", Харьков,

Ю.В. ЛОМОНОСОВ, канд. техн. наук, доц., НУ "ЮАУ им. Я. Мудрого", Харьков,

М.Г. ЛЮБАРСКИЙ, д-р. ф.-м. наук, проф., НУ "ЮАУ им. Я. Мудрого", Харьков

КЛАССИФИКАЦИЯ СИМВОЛОВ В АЛГОРИТМАХ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕКСТА И СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Показано, что получение минимально возможного количества классов при двухэтапной классификации изображений символов текста дает возможность уменьшить ошибку распознавания текста системами оптического распознавания практически на 50% по сравнению с форматом BMP и около 35% – 40% по сравнению с классификацией в формате DjVu. Ил.: 3. Табл.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: классификация, изображения символов, оптическое распознавание.

Постановка задачи. Использование методов классификации является весьма перспективным и развивающимся направлением в теории и практике сжатия изображений различной физической природы [1 – 4]. Наиболее весомое значение эти методы приобретают при сжатии изображений текста, которые используются для перевода печатных изданий в электронный вид. Известно, что из-за резких контрастных границ символов и их большого числа неудовлетворительно работают классические методы сжатия, основанные на ортогональных преобразованиях, в том числе на преобразовании Фурье и вейвлет-анализе [4].

В работе авторов [5] представлен метод сжатия изображений текста, основанный на выделении связных символов и их классификации. Установлено, что практически минимальное количество классов, которые были получены в результате классификации выделенных символов, в значительной степени определяет высокий коэффициент сжатия всего изображения текста.

Было так же отмечено, что благодаря операциям усреднения предложенная классификация символов [5] существенно улучшает качество восстановленного текста в сравнении с исходным. Это обстоятельство обращает на себя внимание и вызывает научный интерес в исследовании влияния классификации связных символов на качество распознавания текста в системах оптического распознавания символов OCR (optical character recognition).

Анализ литературы. В работе [5] показано, что применение двухэтапного алгоритма классификации символьных данных позволяет сформировать графический словарь изображений символов, который содержит практически минимально возможное число классов. Сравнение с лучшим в настоящее время специальным алгоритмом для сжатия изображений текста – JB2, включенным в формат DjVu, показало, что качество классификации у предложенного метода значительно выше, чем у алгоритма JB2. Количество классов, полученных в результате классификации, более чем в 2 – 2,5 раза меньше при разрешениях сканирования в диапазоне 200 – 600 dpi, что, в свою очередь, позволило повысить степень сжатия всего изображения текста по сравнению с алгоритмом JB2 (формат DjVu) почти на 20%.

В данной работе для оценки качества распознавания распространенного изображения текста использовалась наиболее распространенная в настоящее время система OCR, разработанная компанией ABBYY – FineReader 9.

Все современные оптические системы распознавания работают с довольно сложными алгоритмами обработки в различных сегментах изображения. Наиболее распространенные сегменты обрабатываемых изображений: область текста, картинка, таблица, штрих-код, разделитель и т.д. [6 – 8]. Общая ошибка распознавания состоит из ошибок различных типов, которые были получены при обработке всех сегментов изображения [8, 9]. В силу направленности исследований и для минимизации типов ошибок распознавания в качестве исходного изображения использовалась отсканированная страница журнала, содержащая только текст на английском языке. Таким образом, общую ошибку распознавания могут формировать только число неправильно распознанных символов и ошибки форматирования текста [6, 8].

Цель статьи. Получить и проанализировать ошибку распознавания восстановленного текста, полученного в результате использования двухэтапного алгоритма классификации символов. Провести сравнительный анализ количественной оценки качества распознавания текста.

Описание методов. Классификация символов на первом этапе проводится методом "просеивания" [10], который состоит в следующем. Выбирается произвольный элемент из классифицируемого множества и в один класс с ним помещаются все элементы близкие к нему. Далее рассматриваются только элементы, не вошедшие в первый класс. Из их числа произвольно выбирается какой-либо элемент и аналогичным образом строится второй класс. Этот процесс повторяется до тех пор,

пока не будут исчерпаны все элементы исходного множества. Схематично классификация символов на первом этапе представлена на рис. 1.

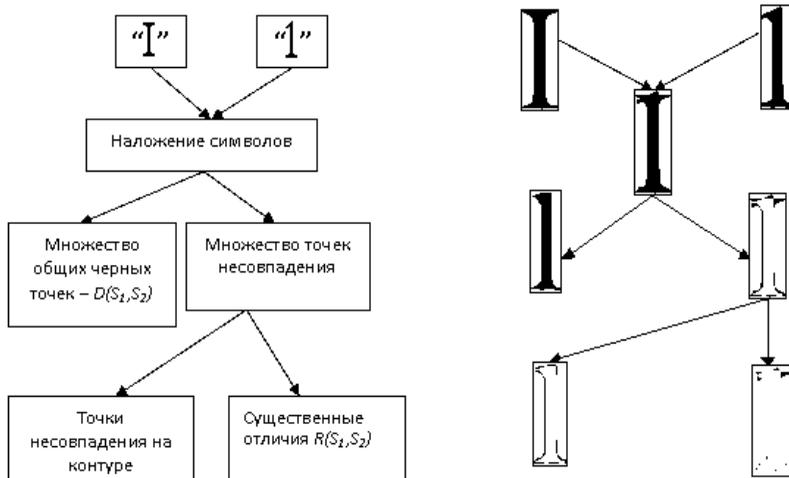


Рис. 1. Классификация символов на первом этапе.

При сравнении двух изображений символов S_1 и S_2 с допустимыми отклонениями по высоте, ширине и периметру (ΔH , ΔW и ΔP) эти изображения накладываются друг на друга с помощью плоскопараллельного переноса так, чтобы их центры тяжести совпадали. Далее подсчитываются две величины: $R(S_1, S_2)$ – количество точек "существенных отличий", и $D(S_1, S_2)$ – количество общих точек совпадения, рис.1.

Первая величина – это количество несовпадающих по яркости (белый – черный) точек, которые не являются смежными для совокупности общих черных точек. Таким образом, количество существенных отличий $R(S_1, S_2)$ игнорирует несовпадения в тех точках, которые лежат на периметрах изображений и, как правило, представляют собою шумы печати и сканирования. Вторая величина – нужна для обезразмеривания первой, чтобы диапазон возможных значений величины

$$\varepsilon(S_1, S_2) = \frac{R(S_1, S_2)}{D(S_1, S_2)} 100\% \quad (1)$$

для всех пар символов не менялся при изменении размера шрифта и разрешения сканирования.

Функция $R(S_1, S_2)$ определяется с учетом веса. Весовой коэффициент каждой точки в $R(S_1, S_2)$ тем больше, чем больше у данной точки таких же смежных точек [11]. Таким образом, полученная величина ε (1), определяющая степень близости изображений двух символов при классификации алгоритмом "просеивания", мало чувствительна к шумам печати и сканирования.

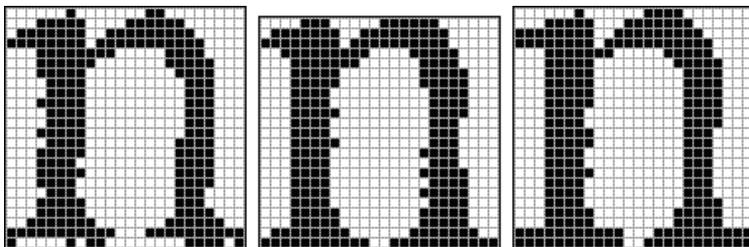
Второй этап классификации реализует алгоритм "наращивания областей" [10], который состоит в том, что на первом шаге, начиная с произвольно выбранного элемента классифицируемого множества, к его классу присоединяются все достаточно близкие элементы. На втором шаге к вновь присоединенным элементам добавляются все элементы, близкие к ним. Процесс "наращивания" повторяется до тех пор, пока на каком-то шаге не окажется новых элементов, которые можно было бы присоединить. Далее все элементы "выращенного" класса исключаются из классифицируемого множества и "выращивается" следующий класс. Алгоритм заканчивает работу, когда в классифицируемом множестве не остается ни одного элемента. На рис. 2 представлены результаты всех этапов классификации символов.

Из приведенных результатов классификации символов на рис. 2 видно, что форма и контуры полученного изображения символа стали намного лучше по сравнению с исходными изображениями того же символа (рис. 2 а) и (рис. 2 г).

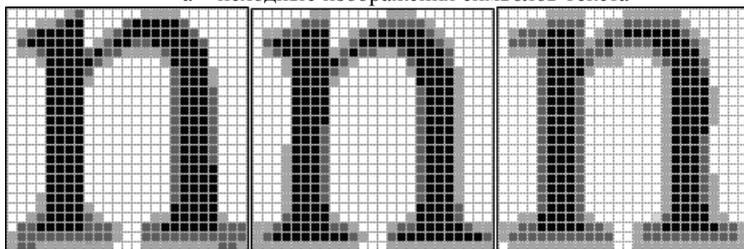
В таблице 1 показано количество классов после основной и повторной классификаций для различных разрешений. Для сравнения приведено количество классов после классификации алгоритмом JB2 (формат DjVu).

Данные, приведенные в таблице, демонстрируют достаточно высокую эффективность как первой, так и повторной классификаций и несомненное преимущество перед алгоритмом JB2.

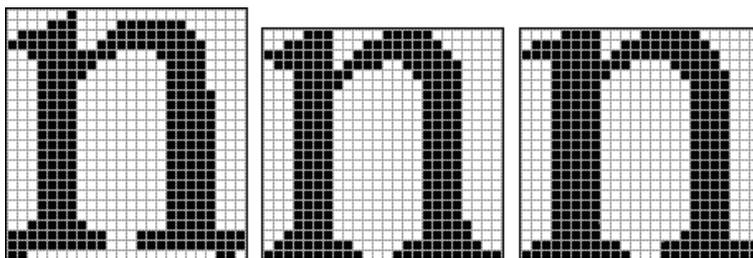
В таблице 2 приведены численные значения ошибок распознавания текста для исходного изображения в формате BMP, после двухэтапной классификации и после классификации алгоритмом JB2 в формате DjVu.



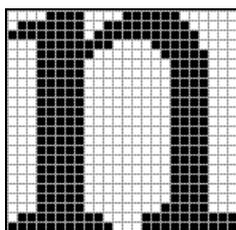
а – исходные изображения символов текста



б – совокупность совмещенных изображений символов в классах на первом этапе



в – усредненные представители классов. Результат первого этапа классификации



г – результат второго этапа классификации. Конечный представитель класса

Рис. 2. Изображения символов двухэтапной классификации

Таблица 1

Количество классов после основной и повторной классификаций

Разрешение изображения текста (dpi)	Количество классов в исходном изображении	Количество классов после основной классификации	Количество классов после второй классификации	Количество классов после классификации алгоритмом JB2
600 dpi	3558	197	72	314
500 dpi	3557	137	72	259
400 dpi	3557	130	71	199
300 dpi	3545	122	95	235
200 dpi	3890	237	148	451

Таблица 2

Количество ошибок распознавания после различных классификаций

Разрешение изображения текста (dpi)	Количество классов в исходном изображении	Количество ошибок распознавания в формате BMP /(%)	Количество ошибок распознавания после двухэтапной классификации /(%)	Количество ошибок распознавания после классификации алгоритмом JB2 /(%)
600 dpi	3558	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%
500 dpi	3557	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%
400 dpi	3557	6 / 0,168%	0 / 0%	4 / 0,112%
300 dpi	3545	16 / 0,451%	8 / 0,225%	14 / 0,394%
200 dpi	3890	42 / 1,079%	26 / 0,668%	39 / 1,0%

На рис. 3 приведена ошибка распознавания для рассматриваемых форматов изображения текста. Подобная количественная оценка качества распознавания (ошибка ~ 1%) свидетельствует о достаточно высоком качестве исходного изображения текста, так как известно, что точность распознавания латинских символов в сканированных печатных документах практически для всех систем OCR превышает 99%.

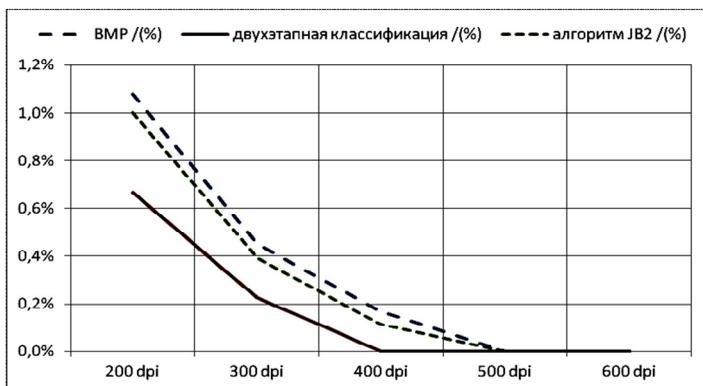


Рис.3. Ошибка распознавания изображения текста

Выводы. Формирование минимально возможного числа классов при двухэтапной классификации изображений символов позволяет: 1) повысить степень сжатия изображения текста по сравнению с алгоритмом JB2 (DjVu) почти на 20% [5]; 2) уменьшить ошибку распознавания текста системами OCR по сравнению с форматами *.bmp и *.djvu на 50% и 35% – 40% соответственно.

Список литературы. 1. Земсков В.Н. Сжатие изображений на основе автоматической классификации / В.Н. Земсков, И.С. Ким // Известия вузов. Электроника. – 2003. – № 2. – С. 50-56. 2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. 3. Иванов В.Г. Сокращение содержательной избыточности изображений на основе классификации объектов и фона / В.Г. Иванов, М.Г. Любарский, Ю.В. Ломоносов // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 3. – С. 93-102. 4. Иванов В.Г. Сжатие изображений на основе автоматической и нечеткой классификации фрагментов / В.Г. Иванов, Ю.В. Ломоносов, М.Г. Любарский // Проблемы управления и информатики. – 2009. – № 1. – С. 52-63. 5. Иванов В.Г. Сжатие изображения текста на основе выделения символов и их классификации / В.Г. Иванов, М.Г. Любарский, Ю.В. Ломоносов // Проблемы управления и информатики. – 2010. – № 6. – С. 74-84. 6. Арлазаров В.Л. Распознавание строк печатных текстов / В.Л. Арлазаров, П.А. Куратов, О.А. Славин // Сб. трудов ИСА РАН "Методы и средства работы с документами". – М.: Эдиториал УРСС. – 2000. – С. 31-51. 7. Форсайт Дэвид А. Компьютерное зрение. Современный подход / Форсайт Дэвид А., Понс Джин. Computer Vision: A Modern Approach. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с. 8. Горелик А.Л. Методы распознавания / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 2004. – 262 с. 9. Ванник В.Н. Теория распознавания образов / В.Н. Ванник, А.Я. Червоненкис. – М.: Наука, 1974. – 416 с. 10. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: справочник / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков и др.; под общ. ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с. 11. Шлезингер М.И. Математические средства обработки изображений / М.И. Шлезингер. – К.: Наукова думка, 1983. – 200 с.

УДК 004.627

Класифікація символів в алгоритмах стиску зображень тексту та системи оптичного розпізнавання / Іванов В.Г., Ломоносов Ю.В., Любарський М.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 83 – 90.

Показано, що отримання мінімально можливої кількості класів при двоетапній класифікації зображень символів тексту дає можливість зменшити похибку розпізнавання тексту системами оптичного розпізнавання практично на 50% в порівнянні з форматом BMP і близько 35% – 40% в порівнянні з класифікацією у форматі DjVu. Іл.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: класифікація, зображення символів, оптичне розпізнавання.

UDC 004.627

Classification of characters is in the algorithms of compression of text and system of optical recognition / Ivanov V.G., Lomonosov U.V., Lyubarsky M.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 83 – 90.

It is proved that the forming of the possible minimum of the quantity of classes within two-stage classification of the text symbol images allows to minimize the error of text recognition by the systems of optical recognition for about 50% as comparing with the BMP format and about 35% – 40% as comparing with classification within DjVu format. Figs.: 3. Tabl.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: classification, images of characters, optical recognition.

Поступила в редакцію 25.07.2012

О.Т. КОЖУХАР, д-р техн. наук, проф., НУ"ЛП", Львів,
Г.І. БАРИЛО, канд. техн. наук, ст. викл. НУ"ЛП", Львів,
М.С. ІВАХ, асистент, НУ"ЛП", Львів,
Н.І. КУС, аспірант, НУ"ЛП", Львів

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ПРИ ФОТОФЕРЕЗИ

Запропоновано принципи побудови системи підтримки прийняття рішення при проведенні лікувального сеансу фотоферезу. На основі цього реалізовано структуру системи, яка забезпечує інтерактивність та автоматизацію процесу. Лл.: 2. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: принцип побудови, система підтримки прийняття рішення, фотоферез.

Постановка проблеми та аналіз літератури. Одним із показників, що застосовують у медичній практиці для прийняття рішення про успішність проведення лікувального сеансу фотоферезу є зміни оптичних характеристик крові або її компонентів [1 – 5]. Фотоферез ґрунтується на опроміненні забраної в пацієнта крові (лейкомаси) ультрафіолетом в апаратах фотоферезу з наступним поверненням її пацієнту [6].

За таким принципом можна забезпечувати індивідуальний підхід для кожного пацієнта та приймати рішення про доцільність проведення сеансу. Це, за рахунок підвищення інформативності впродовж усього сеансу забезпечує ефективність лікування.

Встановлено, що при успішному проведенні сеансу зміни інтенсивності пройденого через лейкомасу крові тестових світлових потоків у заданих ділянках спектру мають бути в межах 10 – 50%. На основі запропонованих принципів побудови реалізовано структуру системи підтримки прийняття рішення, основою якої є блоки перетворення, оброблення та візуалізації тестових оптичних сигналів. Запропонована структура забезпечує неперервне порівняння значень цих змін із візуалізацією результатів, що дозволяє лікарю в інтерактивному режимі приймати рішення щодо оцінювання сеансу для даного пацієнта – про успішність, необхідність повторення або неефективність, а, в окремих випадках, недопустимість цього лікування в подальшому.

Проте, з точки зору сучасних поглядів щодо функціонування системи "лікар-апарат" в інтерактивному режимі, необхідне забезпечення автоматичного комп'ютерного опрацювання результатів із візуалізацією часових залежностей та проектів рішень [7, 8].

Мета роботи полягає у реалізації системи для підтримки прийняття рішення при проведенні процесу фотоферезу.

Основна частина. Запропонована система здійснює автоматичний аналіз оптичних параметрів досліджуваної лейкомаси крові в процесі фотоферезу і на основі отриманих розрахунків формує відповідні проектні рішення (рис.1).

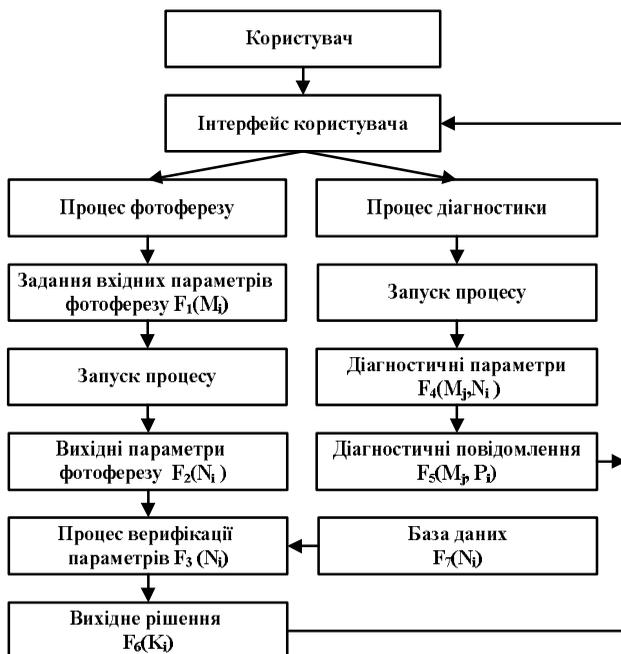


Рис. 1. Структурна схема системи підтримки прийняття рішення

В основу роботи покладено процес верифікації множини оптичних параметрів N_i , які формуються в процесі проведення сеансу, із параметрами бази даних, в результат чого формується відповідне рішення із множини визначених рішень K_i .

При цьому процес верифікації $F_3(N_i)$ складається з множини окремих функцій, зміни кожного оптичного параметра в часі, для N_i :

$$f_{N1} = \{ f(t_0), f(t_2), \dots, f(t_n) \},$$

де $t_n - t_{n-1} = \Delta t$ – час опитування одного каналу.

Умови проведення сеансу фотоферезу визначаються множиною вхідних параметрів M_j .

Система забезпечує проведення процесу самодіагностики, під час якого здійснюється верифікація отриманих параметрів N_i на основі заданих M_j у відповідності до встановлених значень та формування діагностичного повідомлення, відповідно, $F_5(M_j, N_i)$.

Запропоновану систему створено як програмно-апаратний комплекс на основі ПК.

Апаратна частина реалізована у вигляді автономного периферійного пристрою на основі мікроконтролера PSoC CY8C24294. Функціональну схему системи наведено на рис. 2. Фотоприймачі 1, 2 формують вхідний сигнал відповідно до оптичних властивостей лейкомази, який подається на аналогові входи – порти P0[0]...P0[7] PSoC CY8C24294 мікроконтролера.

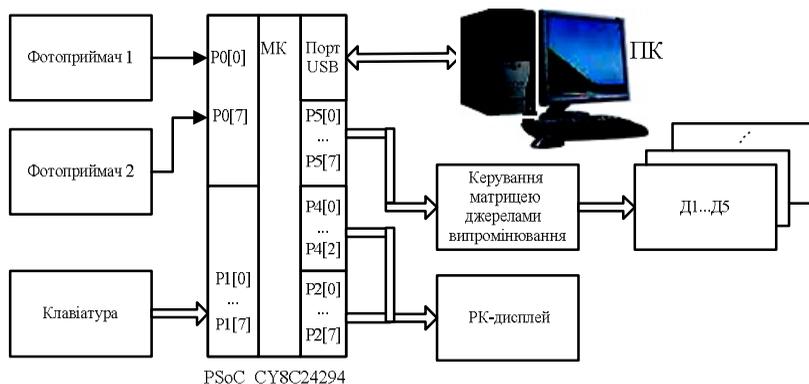


Рис. 2. Функціональна схема апаратної частини: Д1 – Д5 – джерела випромінювання

Мікроконтролер здійснює оброблення вхідної інформації, отримані значення параметрів відображаються на окремому дисплеї та через вбудований USB-порт передаються на ПК. Прикладне програмне забезпечення здійснює верифікацію множини вхідних параметрів із значеннями бази даних. За результатами порівняння формуються повідомлення у зручній для користувача формі. Крім того, прикладне програмне забезпечення здійснює реєстрацію оптичних параметрів протягом всього сеансу фотоферезу. Користувач може вивести на екран ПК отримані результати в аналітичній або цифровій формі. Передбачено

можливість самодіагностики складових частин системи із виведенням відповідних повідомлень на екран ПК. Забезпечення системою зручності для лікаря представлення вихідної інформації і автоматизації процесу оброблення результатів значно підвищує ефективність прийняття рішення щодо проведеного сеансу фотоферезу.

Висновки. На основі запропонованих принципів побудови системи підтримки прийняття рішення при проведенні лікувального сеансу фотоферезу створено нову систему на ґрунті верифікації множини оптичних параметрів N_i , які формуються в процесі проведення сеансу, із параметрами бази даних, із наступним одержанням рішення з множини визначених рішень K_i .

Запропонована система являє собою програмно-апаратний комплекс на основі ПК. Реалізовано систему підтримки прийняття рішення із виведенням у продовж сеансу інформаційних повідомлень у зручній для користувача формі, що завдяки інтерактивності та автоматизації процесу підвищує ефективність лікування.

Список літератури: 1. *Ivakh M.S.* Аналіз змін оптичних характеристик лейкомази при фотоферезі / *M.S. Ivakh, E.P. Kosykh, O.T. Kozhukhar* // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 1 (21). – С. 103-107. 2. Оптоелектронний пристрій контролю рухомої рідини: патент 54889 Україна: МПК G01N 21/85 / *З.Ю. Готра, О.Т. Кожухар, М.С. Скіра, Ю.Я. Кузьо*; власник патенту Національний університет "Львівська політехніка". – № u201006741; заявл. 01.06.2010; опубл. 25.11. 2010, Бюл. № 22. – 2 с. 3. *Zenon Gotra.* System of testing the patient's blood advisability photopheresis treatment / *Gotra Zenon, Ivakh Mariya, Kozhukhar Alexander* // 4th International Forum Science and Technology Days Poland – East, 12-14 April, 2011: Catalogue. – Białowieza: Innovative Eastern Poland Association, 2011. – Р. 31. 4. Оптическая биомедицинская диагностика. В 2 т. Т.1 / Пер. с англ. под ред. *В.В. Тучина*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 560 с. 5. *Хайруліна А.Я.* Банк даних по оптичеським и биофизическим свойствам крови, биотканей и биожидкостей в видимой и ближній ИК-области спектра / *А.Я. Хайруліна, Т.В. Олейник, Л.М. Буй* // Оптичеський журнал. – 1997. – Т. 64. – № 3. – С. 91-97. 6. *Суковатая И.Е.* Фотобиофизика. Версия 1.0 [Електронний ресурс]: електрон. учеб. пособие / *И.Е. Суковатая, В.А. Кратасюк, В.В. Межевикин* и др. – Электрон. дан. (9 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 438 с. – ISBN 978-5-7638-0890-2. – Режим доступа: http://library.krasu.ru/ft/ft/_umkd/141/u_course.pdf. 7. *Абакумов В.Г.* Реєстрація, обробка та контроль біомедичних сигналів: навч. посібник / *В.Г. Абакумов, З.Ю. Готра, С.М. Зленко та ін.* – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 352 с. 8. *Павлов С.В.* Оптоелектронні медичні системи : навч. посібник / *С.В. Павлов, Г.С. Тимчик, В.П. Кожем'яко та ін.* – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с.

УДК 621.384: 621.385: 621.365: 616.31: 537.8

Система підтримки прийняття рішення при фотоферезе / Кожухар А.Т., Барьоло Г.И., Івах М.С., Кус Н.И. / Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 91 – 95.

Предложены принципы построения системы поддержки принятия решения при проведении лечебного сеанса фотофереза. На основе этого реализована структура системы, которая обеспечивает интерактивность и автоматизацию процесса. Ил.: 2. Библиогр.: 8 назв.

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

Ключевые слова: принцип построения, система поддержки принятия решения, фотоферез.

UDK 621.384: 621.385: 621.365: 616.31: 537.8

The system of support decision to photopheresis / Kozhukhar A.T., Barulo G.I., Ivakh M.S., Kus N.I. / Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 91 – 95.

Proposed principles of construction system of decision support during the treatment photopheresis session. On the basis of the implemented system structure that provides interactivity and automation of process. Figs.: 2. Refs.: 8 titles.

Keywords: principles of construction, system of decision support, photopheresis.

Поступила в редакцію 30.07.2012

М.І. КОЗЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., ПВНЗ "Галицька академія",
Івано-Франківськ

ОПТИМАЛЬНИЙ ОБСЯГ СТАТИСТИЧНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З КЕРОВАНОЮ ЕНТРОПІЄЮ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Проведено дослідження ефективності цифрової демодуляції широкосмугових сигналів з керованою ентропією в залежності від розміру статистичної вибірки, що використовується для оцінювання. Отримано числові значення, що дозволяє максимізувати завадостійкість обміну даними в розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних системах та мережах загального та спеціального призначення. Іл.: 2. Бібліограф.: 8 назв.

Ключові слова: статистична вибірка, широкосмуговий сигнал, керована ентропія, комп'ютерна система.

Вступ. Використання широкосмугових сигналів в розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних системах обґрунтовано зростаючими вимогами до сучасних систем та мереж в різних галузях промисловості. Останні досягнення комунікаційних технологій зумовили виникнення нового покоління бездротових комунікаційних засобів таких систем, реалізованих на основі широкосмугових сигналів, що підтверджується значною кількістю публікацій на згадану тему.

Традиційно забезпечення високої достовірності обміну даними в комунікаційних каналах ґрунтується на методах формування та оброблення широкосмугових сигналів з великою базою, при цьому найширше застосування отримали засоби реалізовані на основі формування дискретних псевдовипадкових послідовностей та кореляційного опрацювання сигналів. Проте згадані технології мають низку недоліків, які обмежують їх практичну реалізацію, пов'язану з необхідністю застосування складних апаратних та алгоритмічних методів формування псевдовипадкових послідовностей, необхідністю зберігання еталонів сигналів в пристроях оброблення, використанням складних алгоритмів кореляційного опрацювання та переважним використанням неоптимальних методів оброблення синусоїдних сигналів-носіїв. При цьому, як правило, в якості маніпульованих ознак таких сигналів використовують амплітуду, частоту, фазу або комбінації цих ознак.

Постановка проблеми в цілому. Широке використання бездротових технологій при побудові розподілених комп'ютерних систем та мереж промислового призначення, які функціонують в умовах інтенсивних промислових завод, визначає необхідність пошуку нових

рішень на методичному, структурному та алгоритмічному рівнях при створенні цифрових засобів реалізації комунікацій. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови успішного розв'язання наукових проблем створення та розвитку нових ефективних методів формування та опрацювання широкосмугових сигналів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Традиційні методи (DSSS, FHSS) формування широкосмугових сигналів описані в роботі [1]. Методи формування надширокосмугових сигналів (UWB) описані в роботі [2]. Використання явищ детермінованого динамічного хаосу для цілей формування та оброблення сигналів описано в працях [3, 4]. В роботах [5, 6] запропоновано новий метод формування та опрацювання широкосмугових сигналів з керованою ентропією де значення ентропії розподілу амплітуд сформованого випадкового сигналу ставиться у відповідність до символів вихідного інформаційного повідомлення. Це дає можливість використовувати ентропію для ідентифікації символів повідомлення і не вимагає використання складних алгоритмів генерування псевдовипадкових послідовностей для розширення спектру сигналів. Опрацювання таких широкосмугових сигналів ґрунтується на статистичному оцінюванні значень ентропії відповідних фрагментів суміші сигналу та завад (символьних інтервалів) з подальшим ухваленням рішення про дискретне значення символу повідомлення, що на відміну від кореляційних методів не потребує зберігання еталонів форми оброблюваних сигналів. На даний час проведено дослідження впливу завад, що діють у каналі, на такі сигнали [7]. Оцінена завадостійкість методу. Раніше невирішеною частиною загальної проблеми, є питання оптимізації розміру вибірки, що використовується для оцінювання ентропії, саме цьому і присвячена дана робота.

Формулювання цілей даної роботи. Отже, об'єктом дослідження є завадостійкість методу і його залежність від розміру вибірки при опрацюванні широкосмугових сигналів з керованою ентропією, а отримання кількісних показників є основною метою роботи.

Викладення основного матеріалу досліджень. В [8] отримано наступні аналітичні вирази для завадостійкості методу:

$$P_b \approx Q \left(0,245 \cdot \log_2 \left(1 + 2 \frac{S}{N} \right) \cdot \sqrt{n-1} \right); \quad (1)$$

$$P_b \approx Q \left(0,245 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{4E_b}{N_0 n} \right) \cdot \sqrt{n-1} \right), \quad (2)$$

де S/N – відношення сигнал завада за потужністю;

E_b/N_0 – нормоване відношення сигнал завада;

n – розмір вибірки;

$Q(\cdot)$ – гаусів інтеграл помилок [1].

З виразів (1), (2) можна побачити, що для даного методу значення кількості відліків у вибірці (а отже і значення бази сигналів) істотно впливає на ймовірність помилки при заданому відношенні E_b/N_0 , що пояснюється залежністю потужності завади в точці прийняття рішень від кількості відліків у вибірці. Крім того, залежність аргументу гаусового інтегралу помилок від n не є монотонною. Для встановлення оптимального розміру вибірки знайдено значення n , яке максимізує аргумент гаусового інтегралу помилок в (2) при постійному E_b/N_0 (в даному випадку обрано величину 20 дБ з практичних міркувань). Встановлено, що в таких умовах цей максимум (а отже і мінімум ймовірності помилок), досягається при $n = 105$.

Також проведено моделювання в обчислювальному експерименті, в ході якого побудовано залежність оцінки обраного критерію завадостійкості [1] $\hat{K} = (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)/(2s_0)$ від відношення S/N та розміру вибірки n (див. рис. 1).

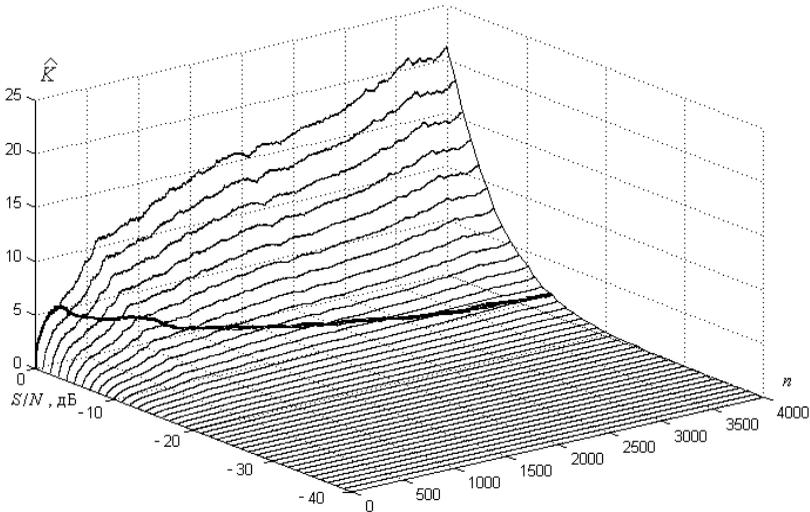


Рис. 1. Залежність $\hat{K} = (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)/(2s_0)$ від n та S/N

На поверхні виділено криву яка відповідає постійному E_b/N_0 (в даному випадку 20 дБ). Ця крива представлена на рис. 2 в залежності

тільки від однієї координати – розміру вибірки. Також на рис. 2 подано значення K , обчислені за (2) (K – аргумент гаусового інтегралу в (2)).

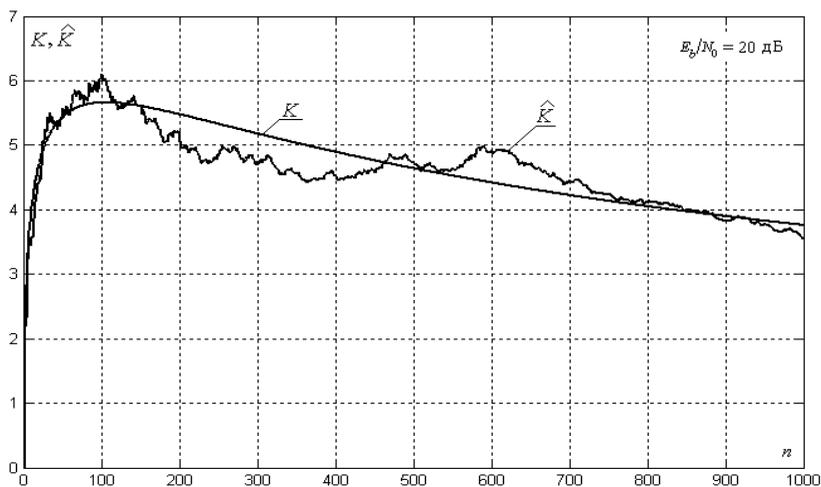


Рис. 2. Залежність $\hat{K} = (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)/(2s_0)$ від n при $E_b/N_0 = 20$ дБ

Основні результати досліджень. З рис. 1 та 2 можна побачити, що у таких умовах оптимальне значення критерію, а отже й мінімальна ймовірність спотворення двійкового символу досягається при розмірах вибірки близько 100 відліків, що при обраній частоті дискретизації відповідає базі сигналу близько 17 дБ, тривалості символного інтервалу 2,08(3) мс та швидкості обміну даними 480 біт/с. Таким чином, можна побачити, що результати моделювання практично збігаються з отриманими аналітично.

Висновки. Отже на практиці слід обирати розмір обсяг вибірки для статистичного оцінювання ентропії суміші корисного сигналу та завади близько 100 відліків прийнятого сигналу.

Перспективи подальших досліджень. Основними напрямками подальшого дослідження є вдосконалення процедури оцінювання ентропії, з метою мінімізації помилки, аналіз завадостійкості при застосуванні інших ймовірнісних характеристик, розроблення ефективних способів демодуляції, дослідження застосування відновлення проміжних відліків сигналу, зокрема за допомогою інтерполяції тощо.

Список літератури: 1. *Bernard Sklar*. Digital communications: fundamentals and applications / *Bernard Sklar*. – Prentice-Hall PTR, 2001. – 1079 р. 2. *Шахнович И.* Сверхширокополосная

связь. Второе рождение ? / И. Шахнович // Электроника: НТБ. – 2001. – № 4. – С. 8–15.

3. Дубровский В. Анализ возможностей применения хаоса в современных системах связи [Электронный ресурс] / В. Дубровский. – Режим доступа: http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/haos2.html

4. Бельский Ю.Л. Передача информации с помощью детерминированного хаоса / Ю.Л. Бельский, А.С. Дмитриев // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38. – № 7. – С. 1310–1315.

5. Пат. 81017 Україна, МПК(2006) H04B 1/69. Спосіб передавання та приймання інформації / С.І. Мельничук, М. І. Козленко (Україна). – заявка № а 2005 08893; заявл. 19.09.2005; опубл. 26.11.2007, Бюл. № 19.

6. Козленко М.І. Формування та обробка ширококутових сигналів на основі випадкових процесів зі змінною ентропією розподілу імовірностей станів / М.І. Козленко, С.І. Мельничук // Наукові вісті інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – 2006. – № 1 (9). – Івано-Франківськ: ІМЕ "Галицька академія", 2006. – С. 28–31.

7. Мельничук С.І. Дослідження статистичних характеристик випадкових сигналів провідникових та радіоканалів обміну даними розподілених систем контролю / С.І. Мельничук, М.І. Козленко // Вісник ХНУ. – 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 2. – Хмельницький: ХНУ, 2005. – С. 62–65.

8. Козленко М.І. Метод та засоби формування і оброблення ширококутових сигналів зі змінною ентропією в розподілених комп'ютерних системах: Автореф. дис. ... к. т. н.: 05.13.05 / М.І. Козленко; НУ "Львівська політехніка". – Захист 27.03.2009. – Львів, 2008. – 20 с.

Статтю представив д.т.н., проф. ПВНЗ "Галицька академія" Адасовський Б.І.

УДК 681.325

Оптимальный объем статистической выборки для цифровой демодуляции широкополосных сигналов с управляемой энтропией / Козленко М.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 96 – 100.

Проведено дослідження ефективності цифрової демодуляції широкополосних сигналів з управляємою ентропією в залежності від розміра статистичної вибірки, яка використовується для оцінювання. Отримані числові значення, що дозволяють максимізувати помехостійкість обміну даними в розподілених комп'ютерних і телекомунікаційних системах і мережах загального і спеціального призначення. Ил.: 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: статистическая выборка, широкополосный сигнал, управляемая энтропия, компьютерная система.

UDC 681.325

Optimal dimension of the statistical sample for the variable entropy spread spectrum signals digital demodulation / Kozlenko M.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 96 – 100.

Optimal dimension of the statistical sample for the variable entropy spread spectrum signals digital demodulation has been obtained. Optimal dimension samples using improves the noise proof feature index of the data communication in the distributed computer and telecommunication systems. Figs.: 2. Refs.: 8 titles.

Keywords: statistical sample, spread spectrum signal, variable entropy, computer system.

Надійшла до редакції 10.07.2012

Ю.П. КОНДРАТЕНКО, д-р техн. наук, проф., ЧДУ ім. П. Могили,
Миколаїв,
О.В. КОРОБКО, аспірант, НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв,
А.І. СВІРІДОВ, бакалавр, НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв

ФІЛЬТРАЦІЯ ЗАВАД ТА АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ ТА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ADALINE

В статі розглянуто існуючі методи фільтрації завад за допомогою фільтрів, що використовують адаптивні алгоритми (метод найменших квадратів – LMS, метод рекурсивних найменших квадратів – RLS), та нейронної мережі ADALINE. Наведені часові діаграми результатів фільтрації сигналу від завад в залежності від параметрів адаптивних алгоритмів. Проаналізовані отримані результати фільтрації. Іл.: 5. Бібліогр.: 19 назв.

Ключові слова: фільтрація завад, адаптивні алгоритми, нейронна мережа ADALINE, часові діаграми.

Постановка проблеми. Цифрова обробка сигналів (ЦОС) у складних радіоелектронних системах характеризується низкою особливостей, серед яких: неможливість передбачення корисного сигналу, складність фільтрування сигналу від шуму (зокрема, від "білого шуму") і т.п. [1]. Сукупність даних факторів ускладнює розв'язання радіотехнічних завдань, що пов'язані з ЦОС. Одним з важливих напрямків застосування цифрової обробки сигналів є сфера задач цифрової фільтрації. Використання цифрових фільтрів має низку переваг перед аналоговими, зокрема, можливість створення фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ), фільтрів високих порядків, високої точності (точність аналогових фільтрів обмежена допусками на елементи), гнучких в налаштуванні [1, 2].

Аналіз літератури. У високоякісних системах цифрова обробка сигналів часто здійснюється в умовах невизначеності системних характеристик, а отже апріорна і поточна інформація про параметри системи є неповною. Це обумовлено наявністю джерел випадкових перешкод і другорядних процесів (з точки зору вирішення задачі) з непередбачуваною поведінкою. Таким чином, стохастичність і нестационарність об'єктів та умов їх функціонування визначають фактор складності системи. Одним з найбільш перспективних шляхів подолання труднощів, породжуваних цим фактором, є застосування адаптивних алгоритмів [3 – 6] та нейронних мереж [7 – 10]. В даний час в задачах адаптивної фільтрації сигналу, як правило, знаходять своє застосування

адаптивні фільтри, синтезовані на основі методів найменших квадратів (Least Mean Square – LMS) та рекурсивних найменших квадратів (Recursive Least Square – RLS) [11 – 13]. Суть цих методів полягає в поступовому наближенні значень коефіцієнтів фільтрів до шуканих (бажаних) з використанням методів регресійного аналізу. Разом з тим, все більшого поширення набувають системи фільтрації, синтезовані на основі нейронних мереж [7 – 9, 14].

Метою статті є порівняльний аналіз якісних (відносна похибка фільтрування) та часових (час налаштування фільтру) характеристик адаптивних фільтрів, що синтезовані з використанням нейронної мережі ADALINE та адаптивних алгоритмів LMS, RLS.

Виклад основного матеріалу. Всі способи використання адаптивних фільтрів, так чи інакше, зводяться до розв’язання задачі ідентифікації, тобто до визначення характеристик певної системи. На рис. 1 наведена структурна схема адаптивного фільтру [4, 8, 11, 14], синтезованого з використанням методу найменших квадратів та рекурсивних найменших квадратів [13, 15].

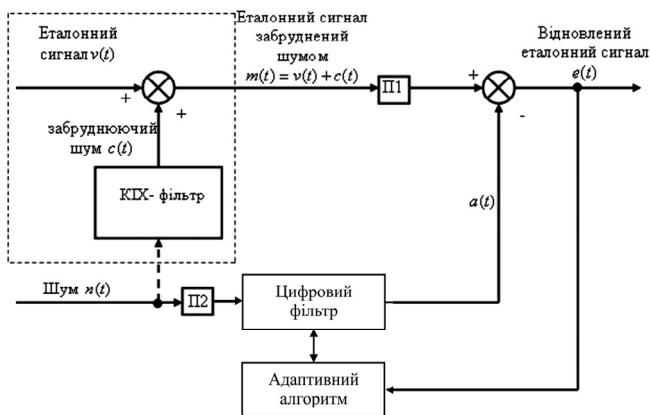


Рис. 1. Структурна схема адаптивного фільтру

Основні принципи реалізації адаптивних алгоритмів фільтрації розглянемо більш детально. Припустимо, що необхідно забезпечити комп’ютеризований вимірювальний комплекс системою зв’язку, при цьому сигнал, що сприймається приймачем П1, неминуче виявиться сильно забрудненим сторонніми сигналами (шумами). В реальних умовах функціонування позбутися цих шумів неможливо, але можна отримати

зразок шумового сигналу $n(t)$ (рис. 1), встановивши другий приймач П2 в безпосередній близькості від джерела шуму.

Вхідним сигналом адаптивного фільтра (рис. 1) є шумовий сигнал $n(t)$ від додаткового приймача П2, а в якості еталонного сигналу використовується сигнально-шумова суміш, сприйнята основним приймачем П1. Адаптивний фільтр прагне перетворити вхідний сигнал $m(t)$ таким чином, щоб зробити його якомога ближчим до корисного $v(t)$. Оскільки з вхідним сигналом фільтра корельовано [5] лише шумову складову зразкового сигналу, то в усталеному режимі на виході фільтра буде отримана оцінка шуму, присутнього в еталонному сигналі. Сигнал помилки, що розраховується як різниця між еталонним сигналом $m(t)$, забрудненим шумом, і вихідним сигналом адаптивного фільтра $a(t)$, буде в цьому випадку представляти собою відфільтрований від шуму зразковий сигнал $e(t)$ [3, 4].

Вибір типу фільтру і алгоритму його реалізації є важливими компонентами процесу проектування вискоєфективних систем зв'язку. Для порівняльного аналізу ефективності процесів фільтрації розглянемо адаптивні алгоритми, синтезовані з використанням методів RLS та LMS і нейронної мережі ADALINE [16, 17, 18].

Для спрощення математичних викладок припустимо, що сигнали фільтра являються мовними. Однак результуючі формули легко узагальнюються на випадок комплексних сигналів і фільтрів [12, 15]. Більш детальний розгляд даних алгоритмів наведено в [3, 4, 6].

Адаптивний алгоритм найменших квадратів (Least Mean Square – LMS). Нехай вхідний дискретний випадковий сигнал $n(t)$ (рис. 1) обробляється нерекурсивним дискретним фільтром порядку N , коефіцієнти якого можуть бути представлені вектор-стовпцем $w = [w_0, w_1, \dots, w_N]^T$, тоді вихідний сигнал цифрового фільтра (1) дорівнює

$$a(t) = u^T(t)w, \quad (1)$$

де $u(t) = [x(t), x(t-1), \dots, x(t-n)]^T$ – вектор-стовпець вмісту лінії затримки фільтра на t -му кроці.

Помилка відтворення (2) зразкового сигналу $m(t)$, відповідно, визначається як [12, 15]

$$e(t) = m(t) - a(t) = m(t) - u^T(t)w. \quad (2)$$

Адаптивному алгоритму необхідно знайти такі коефіцієнти фільтра w , які забезпечують максимальну близькість вихідного сигналу $a(t)$ до зразкового $m(t)$, тобто мінімізують помилку $e(t)$ (рис. 1). Оскільки $e(t)$ також є випадковим процесом, в якості міри її величини розумно прийняти середньоквадратичне значення, тоді функціонал, що оптимізується (3) можна визначити як [4]

$$J(w) = \overline{e^2(t)} \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$e^2(t) = (m(t) - u^T(t)w)^2 = m^2(t) - 2m(t)u^T(t)w + w^T u(t)u^T(t)w. \quad (4)$$

Статистично усереднюючи вираз (4), отримаємо (5)

$$J(w) = \overline{e^2(t)} = \overline{m^2(t)} - 2\overline{m(t)u^T(t)w} + \overline{w^T u(t)u^T(t)w}, \quad (5)$$

де $\overline{m^2(t)} = \sigma_d^2$ – середній квадрат зразкового сигналу; $\overline{m(t)u^T(t)} = p^T$ – транспонований вектор-стовпець взаємних кореляцій p між t -м відліком зразкового сигналу і вмістом лінії затримки u фільтра; $\overline{u(t)u^T(t)} = R$ – кореляційна матриця сигналу, що має розмір $(N+1) \times (N+1)$.

Метод найшвидшого спуску, що базується на пошуку мінімуму цільової функції (5), є головним критерієм адаптації алгоритму (5) найменших квадратів. При використанні даного способу оптимізації вектор коефіцієнтів w повинен рекурсивно оновлюватися наступним чином (6)

$$w(t+1) = w(t) - \frac{\mu}{2} \text{grad}J(w(t)) = w(t) + \mu \cdot p - \mu R w(t), \quad (6)$$

де μ – розмір кроку градієнтного спуску; p – вектор-стовпець взаємних кореляцій між t -м відліком зразкового сигналу і вмістом лінії затримки фільтра; R – кореляційна матриця сигналу, що має розмір $(N+1) \times (N+1)$.

Докладний аналіз збіжності даного процесу наведено в [4]. Показано, що алгоритм сходиться, якщо $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$, де λ_{\max} – максимальне власне число кореляційної матриці R , проте для розрахунку градієнта необхідно знати значення матриці R і вектора p . На практиці можуть бути доступні лише оцінки цих значень, отримані за вхідними даними. Такими найпростішими оцінками є миттєві значення кореляційної матриці (7) і вектора взаємних кореляцій (8), що отримуються без будь-якого усереднення [12, 15]

$$R(t) = u(t)u^T(t); \quad (7)$$

$$p(t) = m(t)u(t). \quad (8)$$

При використанні даних оцінок формула (6) приймає вигляд (9)

$$w(t+1) = w(t) + \mu u(t)(m(t) - u^T(t)w(t)). \quad (9)$$

Вираз, що стоїть в дужках, згідно з (2) являє собою помилку фільтрації $e(t)$, з урахуванням цього, вираз для рекурсивного оновлення коефіцієнтів фільтра має вигляд (10)

$$w(t+1) = w(t) + \mu e(t)u(t). \quad (10)$$

Основною перевагою алгоритму LMS є гранична обчислювальна простота – для підстроювання коефіцієнтів фільтра на кожному кроці потрібно виконати $N+1$ операцій "множення-складання". Наслідком цього є повільна збіжність і підвищена дисперсія похибки в усталеному режимі – коефіцієнти фільтра завжди коливаються навколо оптимальних значень, що і збільшує рівень вихідного шуму [5, 6].

Адаптивний алгоритм рекурсивних найменших квадратів (Recursive Least Square – RLS). При розгляді попереднього алгоритму вхідний сигнал вважався випадковим процесом і мінімізувався середній квадрат помилки відтворення зразкового сигналу. У разі прийому нестационарного сигналу статистичне усереднення може бути неможливо і потрібно вести обробку по одній або декількох реалізаціях процесу, тоді оптимізаційна задача може бути сформульована наступним чином: потрібно відшукати такі коефіцієнти фільтра w , щоб норма помилки (11) відтворення зразкового сигналу була мінімальною [3, 4].

$$J(w) = \sum_{t=0}^{T-1} |e(t)|^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Перейдемо до матричного запису вздовж координати t , отримавши формули для векторів-стовпців вихідного сигналу a (12) і для помилки відтворення вхідного сигналу e (13) [12, 15]:

$$a = U^T w; \quad (12)$$

$$e = m - U^T w, \quad (13)$$

де m – вектор-стовпець відліків зразкового сигналу; $U = [u(0), u(1), \dots, u(T-1)]$ – матриця, стовпці якої представляють собою вміст лінії затримки фільтра на різних тактах.

Вираз (11) для норми помилки можна переписати в матричному вигляді наступним чином

$$J(w) = e^T e \rightarrow \min. \quad (14)$$

Підставивши (12) та (13) в (14), отримаємо (15) [5]

$$J(w) = (m - U^T w)^T (m - U^T w) = m^T m - w^T U m - m^T U^T w + w U U^T w. \quad (15)$$

Для знаходження мінімуму цільової функції необхідно обчислити градієнт даного функціоналу і прирівняти його до нуля.

$$\text{grad} J(w) = -2Um + 2UU^T w = 0. \quad (16)$$

Звідси шукане оптимальне рішення (9) дорівнює

$$w = (UU^T)^{-1}Um. \quad (17)$$

В процесі прийому сигналу можливо на кожному черговому кроці перераховувати коефіцієнти фільтра безпосередньо за формулою (17), однак це пов'язано з невиправдано великими обчислювальними витратами. Дійсно, розмір матриці U постійно збільшується і, крім того, необхідно щоразу заново обчислювати зворотну матрицю $(UU^T)^{-1}$.

Скоротити обчислювальні витрати можна, якщо врахувати, що на кожному кроці до матриці U додається лише один новий стовпець, а до вектора m – один новий елемент. Це дає можливість організувати обчислення рекурсивно.

Головною перевагою алгоритму RLS є швидка збіжність. Однак досягається це за рахунок значного ускладнення (у порівнянні з алгоритмом LMS) обчислень. Згідно [4], при оптимальній організації обчислень для оновлення коефіцієнтів фільтра на кожному такті потрібна $2.5N^2 + 4N$ пара операцій "множення-складання" [4, 12, 15].

Нейронна мережа ADALINE. У 1960 р. Уїдроу і його аспірант Хофф запропонували мережу ADALINE (ADAPtive LLinear NEuron) і розробили правило навчання, назване правилом Уїдроу-Хоффа [9, 7, 11]. Правило Уїдроу-Хоффа використовується для навчання мережі, що складається з шару розподільних нейронів і одного вихідного нейрона з

лінійною функцією активації. Вихідне значення такої мережі визначається за формулою (18) [8, 9].

$$y = \sum_{i=1}^n w_{i1} \cdot x_i - S_0, \quad (18)$$

де n – число нейронів розподільного шару; S_0 – зсув.

Правило навчання Уїдроу-Хоффа відомо під назвою дельта-правила (delta-rule) та передбачає мінімізацію [17,18] середньоквадратичної помилки (19) нейронної мережі, яка для L вхідних образів визначається як

$$E = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^L (y^{(k)} - t^{(k)})^2, \quad (19)$$

де $y^{(k)}$ і $t^{(k)}$ – вихідне і цільове значення мережі для k -го образу.

Дельта-правило базується на методі градієнтного спуску в просторі вагових коефіцієнтів і змішень нейронної мережі [18]. За цим методом ваги і зміщення змінюються з часом за виразами (20) та (21)

$$w_{i1}(t+1) = w_{i1}(t) - \alpha \cdot \frac{\partial E(k)}{\partial w_{i1}(t)}; \quad (20)$$

$$S_0(t+1) = S_0(t) - \alpha \cdot \frac{\partial E(k)}{\partial S_0(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (21)$$

де α – швидкість навчання ($0 < \alpha < 1$); $x_i^{(k)}$ – i -а компонента k -го образу.

Після обчислення часткової похідної (22)

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w_{i1}(t)} = \frac{\partial E(k)}{\partial y^{(k)}} \cdot \frac{\partial y^{(k)}}{\partial w_{i1}(t)} = (y^{(k)} - t^{(k)}) \cdot x_i^{(k)}, \quad (22)$$

вираз для адаптивного оновлення значень ваг нейронної мережі (23) приймає значення [8, 9, 18]

$$w_{i1}(t+1) = w_{i1}(t) - \alpha \cdot (y^{(k)} - t^{(k)}) \cdot x_i^{(k)}, \quad (23)$$

де w – матриця вагів; x – вектор входів; t – номер ітерації; $(y^{(k)} - t^{(k)})$ – помилка; α – позитивна константа.

Мережа ADALINE на сьогоднішній день є однією з найбільш широко використовуваних архітектур, в основному завдяки застосуванню в задачах адаптивної фільтрації [13, 14, 17].

Дослідження впливу порядку адаптивних фільтрів на якість фільтрації. Одним з головних параметрів, що впливають як на швидкодію так і на якість фільтрації цифрових фільтрів є їх порядок, а отже доцільно провести аналіз впливу порядку цифрового фільтру на якість фільтрації при застосуванні адаптивних алгоритмів.

Проведена авторами оцінка якісних показників процесу фільтрації в залежності від порядку фільтра здійснена з використанням методів оцінки гіпотез математичної статистики, а саме:

– *Кореня із середнього для квадрата помилки (RMSE)*, що є оцінкою стандартного відхилення випадкової компоненти між даними синтезованої регресійної моделі та дослідними значеннями [19]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2} \rightarrow 0, \quad (24)$$

де x – вектор значень еталонного сигналу; x^* – вектор значень вихідного сигналу фільтру; n – кількість відліків вхідного сигналу.

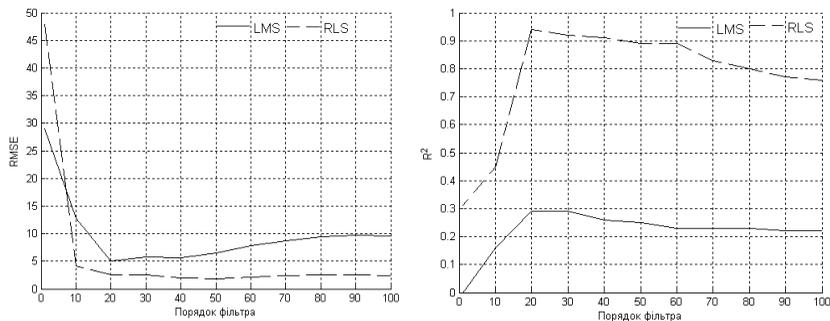
– *Коефіцієнту детермінації (R^2)*, що є часткою дисперсії відхиленя залежної змінної від її середнього значення. Іншими словами, R^2 – це квадрат змішаної кореляції між експериментальними значеннями та значеннями синтезованої математичної моделі [19]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \rightarrow 1, \quad (25)$$

де $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – середнє арифметичне значення вхідного сигналу.

Результати оцінки якості процесів фільтрації з використанням адаптивних алгоритмів RLS та LMS наведено на рис. 2.

Аналізуючи результати фільтрації адаптивних алгоритмів при різних значеннях порядку фільтра можна стверджувати, що збільшення порядку фільтра призводить до покращення результатів фільтрації лише в певному проміжку значень, так для RLS-фільтра оптимальний порядок фільтру лежить в межах [28..45], а для LMS-фільтру в межах [20..40].



а – за показником якості RMSE

б – за показником якості R^2

Рис. 2. Ефективність роботи фільтрів на основі адаптивних алгоритмів RLS та LMS при різному порядку фільтра

Слід також відмітити, що збільшення порядку фільтра призводить до зменшення швидкодії обчислювальної системи та підвищення складності адаптивних алгоритмів, а тому для оцінки часових характеристик процесів фільтрації авторами обрано порядок фільтрів рівним 32.

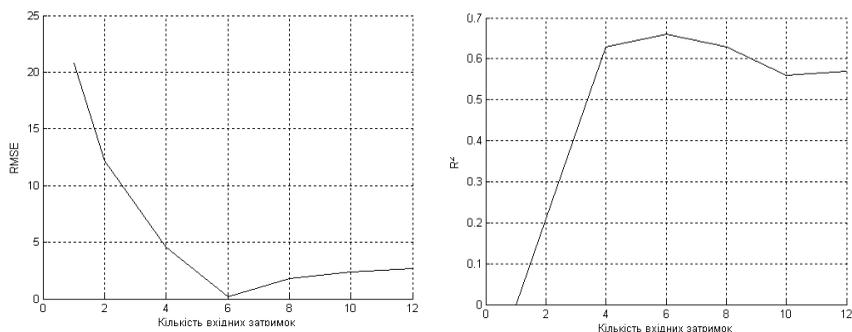
Аналогом порядку фільтра для нейронної мережі ADALINE є кількість ліній вхідних затримок d , а отже доцільно провести якісну оцінку процесів фільтрації з використанням нейронної мережі ADALINE при різній кількості ліній вхідних затримок.

Наведені на рис. 3 результати фільтрації нейронної мережі ADALINE при різній кількості вхідних затримок свідчать про те, що найкращі показники роботи нейро-мережевого фільтра забезпечуються при використанні 6 ліній вхідних затримок [8].

Моделювання процесів фільтрації цифрових фільтрів на основі адаптивних алгоритмів RLS, LMS та нейронної мережі ADALINE. Для аналізу швидкодії адаптивних алгоритмів авторами проведено моделювання фільтрації звукового сигналу голосу людини $v(t)$, який додатково забруднено шумом $m(t)$ (рис. 4). При моделюванні порядки адаптивних фільтрів на основі алгоритмів RLS та LMS встановлено рівними 32, а нейронна мережа ADALINE має 6 ліній затримок.

Аналізуючи часові діаграми (рис. 4), можна впевнено говорити, що усі фільтри в тій чи іншій мірі розв'язують задачу шумопоглинання. У фільтра на основі алгоритму LMS за 5000 тактів різниця між еталонним вхідним сигналом і вихідним адаптованим в процентному співвідношенні складає 20 – 25%. В свою чергу у фільтра на основі алгоритму RLS за той самий час відносна похибка дорівнює 3 – 5%, причому відносна похибка менша за 10%, настає вже після 1500 тактів. Ця швидша збіжність

досягається за рахунок значного ускладнення обчислень (у порівнянні з алгоритмом LMS).



а – за показником якості RMSE

б – за показником якості R^2

Рис. 3. Ефективність роботи фільтра на основі нейронної мережі ADALINE при різній кількості вхідних затримок

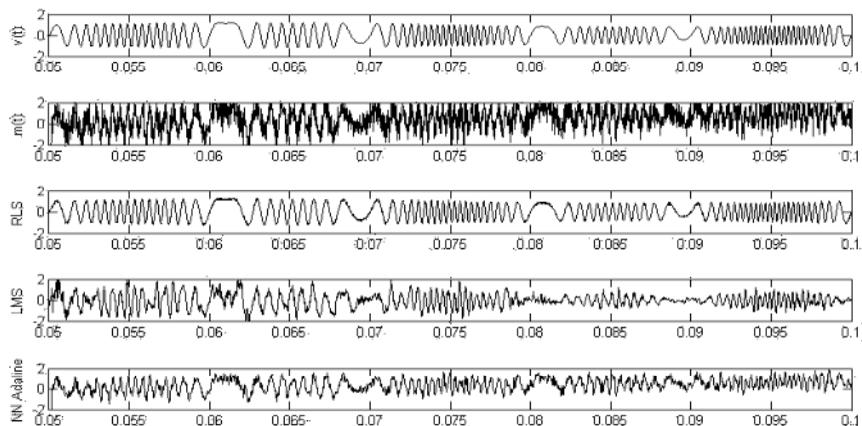


Рис. 4. Результати фільтрації сигналу з використанням нейронної мережі ADALINE та адаптивних алгоритмів LMS та RLS
 $v(t)$ – еталонний сигнал; $m(t)$ – сигнал забруднений шумом

Фільтр на основі нейронної мережі ADALINE справляється з задачею шумопоглинання з ефективністю в 8 – 10%, проте слід зазначити, що при моделюванні використовувалась попередньо навчена нейронна мережа. Навчання нейронної мережі відбувалось на основі еталонного сигналу $v(t)$ та забрудненого сигналу $m(t)$ на проміжку часу $[0, \dots, 0.05]$ на протяжні 100 епох. Відносна похибка вихідного сигналу нейронної мережі під час навчання після 5000 тактів складає лише 1 – 3%.

Висновки. Застосування адаптивних алгоритмів та нейронної мережі ADALINE навіть при многократному перевищенні шуму над корисною складовою в виміряному сигналі дозволяє отримати очищений від шуму корисний сигнал практично без спотворень.

Фільтр на основі метода найменших квадратів (LMS) має найгірші результати збіжності серед усіх фільтрів розглянутих в даній роботі, що пов'язано з простотою LMS алгоритму та дозволяє використовувати метод LMS в умовах коли швидкість збіжності не відіграє значну роль.

Фільтр, створений на основі метода рекурсивних найменших квадратів (RLS), має найкращі результати серед усіх розглянутих фільтрів. Але складність його реалізації та великі розрахункові процедури під час фільтрації ускладнюють використання цього фільтра. Даний фільтр доцільно використовувати коли якість та швидкість фільтрації стоять на першому місці і забезпечується наявність великих розрахункових потужностей.

Перевагами фільтра, створеного на основі нейронної мережі ADALINE, є добра збіжність і простота реалізації. Проте використання нейромережових фільтрів зумовлює необхідність їх попереднього навчання, а отже динаміка та якість роботи системи фільтрації буде залежати від обраного алгоритму навчання, що призводить до ускладнення етапу проектування системи.

Виходячи з отриманих результатів, в подальшому авторам доцільно провести порівняльний аналіз швидкодії зазначених алгоритмів на сучасних мікропроцесорних системах цифрової обробки даних.

Список літератури: 1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2006. – 607 с. 2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: "Вильямс", 2004. – 992 с. 3. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С.Д. Стурнз. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с. 4. Адаптивные фильтры / Под ред. К.Ф.Н. Коузна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. 5. Glentis G.O. Efficient Least Squares Adaptive Algorithms for FIR Transversal Filtering / G.O. Glentis, K. Berberidis, S. Theodoridis // Signal Processing Magazine, IEEE. – 1999. – Vol. 16. – №4. – P. 13-41. 6. Haykin S. Adaptive Filter Theory / S. Haykin. – Prentice Hall, 2002. – 920 p. 7. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с. 8. Steel D.C. Neural networks for communications / D.C. Steel. – Department of Computer Science and Engineering University of Warwick, Coventry, 2001. – 351 p. 9. Медведев В.С. Нейронные сети / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: Диалог МИФИ, 2002. – 496 с. 10. Дьяконов В.П. Компьютерная математика: Теория и практика / В.П. Дьяконов. – М.: Нолидж, 2001. – 1295 с. 11. Widrow B. Noise Canceling and Channel Equalization / B. Widrow, M.A. Lehr // Handbook of Brain Theory and Neural Networks. – MIT Press, 1995. – P. 648-650. 12. Саломатин С.Б. Компьютерное моделирование и обработка нестационарных сигналов / С.Б. Саломатин, А.И. Бурак. – Минск, 2004. – 36 с. 13. Paraskeva George. Neural fuzzy theory and adaptive noise cancellation techniques / George Paraskeva. – University of Warwick, 2003. – 93 p. 14. Abend Kenneth. The 2001 Benjamin Franklin Medal in Engineering presented to

Bernard Widrow / *Kenneth Abend* // Journal of the Franklin Institute. – 2002. – № 339. – P. 283–294. **15.** *Сергиенко А.Б.* Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB / *А.Б. Сергиенко* // *Exponenta Pro. Математика в приложениях.* – 2003. – № 1. – С. 18-28. **16.** *Круглов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика / *В.В. Круглов, В.В. Борисов.* – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с. **17.** *Widrow B.* Adaptive switching circuits / *B. Widrow, M. Hoff* // IRE WESCON Convention, 1960. – P. 96-104. **18.** *Калацкая Л.В.* Организация и обучение искусственных нейронных сетей / *Л.В. Калацкая, В.А. Новиков.* – Мн.: БГУ, 2002. – 76 с. **19.** *Королюк В.С.* Справочник по теории вероятности и математической статистике / *В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин.* – М.: Наука, 1985. – 640 с.

УДК 519.218.82+004.032.26

Фильтрация помех и анализ характеристик фильтров на основе адаптивных алгоритмов и нейронной сети ADALINE / Кондратенко Ю.П., Коробко А.В., Свиридов А.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 101 – 112.

В статье рассмотрены существующие методы фильтрации помех с помощью фильтров, использующих адаптивные алгоритмы (метод наименьших квадратов – LMS, метод рекурсивных наименьших квадратов – RLS) и нейронной сети ADALINE. Приведенные временные диаграммы результатов фильтрации сигнала в зависимости от параметров адаптивных алгоритмов фильтрации помех. Проанализированы полученные результаты фильтрации. Ил.: 4. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: фильтрация помех, адаптивные алгоритмы, нейронная сеть ADALINE, временные диаграммы.

UDC 519.218.82+004.032.26

Noise cancellation and characteristics analysis of the filters based on adaptive algorithms and neural network ADALINE / Kondratenko Y.P., Korobko O.V., Sviridov A.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 101 – 112.

The article considers the existing methods of noise filtering by filters using adaptive algorithms (least squares method – LMS and recursive least squares method – RLS), and neural network ADALINE. Time-diagrams of noise filtering results depending on the parameters of adaptive filter algorithms are given. The results of filtration are analyzed and compared. Figs.: 4. Refs.: 19 titles.

Keywords: noise cancellation, adaptive algorithms, neural network ADALINE, time diagrams.

Надійшла до редакції 02.08.2012

Н.А. КРАШНОШЛЫК, преп., ЧНУ, Черкассы,
А.О. БОГАТЫРЁВ, канд. физ.-мат. наук, доц., ЧНУ, Черкассы

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОЙ КОНКУРЕНЦИИ ФАЗ НА ОСНОВЕ КВАЗИДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ

В работе предложена квазидвумерная математическая модель движения межфазной границы в бинарной металлической системе с учётом различия парциальных мольных объёмов компонентов. Проведено численное моделирование процессов роста/угнетения фаз в системе Cu-Sn. Ил.: 4. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: парциальный мольный объём, диффузионная конкуренция фаз, межфазная граница.

Постановка проблемы и анализ литературы. При создании новых металлических материалов перспективными соединениями являются металлические сплавы, содержащие интерметаллидные фазы. Данные фазы, или просто интерметаллиды, представляют собой соединение двух или более металлов, имеющее структуру, отличную от структуры его компонентов.

В настоящее время в сплавах обнаружено примерно 1300 интерметаллических соединений, кристаллизующихся в 200 типов структур. Как правило, интерметаллиды оказывают определяющее влияние на упрочнение сталей, многих жаропрочных сплавов, а также на свойства жаростойких защитных покрытий [1].

Для прогнозирования фазового состава сплава и последующего изучения процессов роста/угнетения отдельных фаз требуются математические модели для их описания. Описание процессов многофазной диффузии, как задачи с подвижными границами, дано, например, в работах [2 – 3]. Однако при построении большинства таких моделей, как правило, пренебрегают возможным изменением объёма реальной металлической системы. На необходимость такого учёта впервые обратили внимание F. Sauer и V. Freise [4]. Впоследствии учёт мольного объёма образца, как дополнительного фактора, при описании взаимной диффузии встречается в работах A.G. Guy [5], S. Tsuji [6] и др.

Цель статьи – построить математическую модель движения межфазной границы при взаимной диффузии в двумерной области с учётом различия парциальных мольных объёмов компонентов; провести численное исследование роста/угнетения фаз в системе $Cu - Sn$.

Описание математической модели и её реализация. Рассмотрим процесс диффузионного взаимодействия в системе $A-B$ для двумерной области. Уравнения, определяющие результирующий поток атомов каждого сорта с учётом различия парциальных мольных объёмов, имеют следующий вид:

$$J_A = -\tilde{D} \frac{\Omega_B}{V_m^2} \nabla N_A + \frac{N_A}{V_m} v, \quad J_B = -\tilde{D} \frac{\Omega_A}{V_m^2} \nabla N_B + \frac{N_B}{V_m} v, \quad (1)$$

где N_i – мольная доля компонента i , $i = A, B$, ($N_A + N_B = 1$); \tilde{D} – коэффициент взаимной диффузии ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$); V_m – мольный объём фазы ($\text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$); $\Omega_i = \partial V_m / \partial N_i$ – парциальный мольный объём i -го компонента ($\text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$); v – скорость смещения, обусловленная различием парциальных мольных объёмов компонентов системы в соседних фазах ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Уравнения (1) являются обобщением на многомерный случай уравнений для потоков, которые являлись основополагающими для одномерной многофазной модели из [7]. На их основе предлагается квазидвумерная математическая модель диффузионной конкуренции фаз в двухфазной бинарной металлической системе.

Пусть диффузионный образец представляет собой прямоугольную область $L = \{(x, y) | 0 \leq x \leq l_x, 0 \leq y \leq l_y\}$, разделяемую криволинейной межфазной границей $s(t)$ на две фазы, рис. 1.

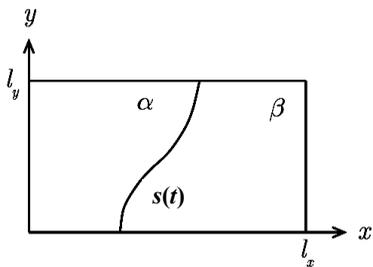


Рис. 1. Двумерная двухфазная область L

Общая идея построения предлагаемой квазидвумерной модели состоит в том, что некоторая двумерная область L делится параллельно координатной оси Ox на несколько равных частей. В каждом полученном слое и между слоями протекает диффузионный процесс, описываемый двумерным уравнением диффузии. Движение межфазной

границы, направленное по нормали к ней, будем рассматривать в данном слое только вдоль оси Ox . Таким образом, приближение данной модели состоит в том, что вместо вектора скорости движения границы используется его проекция на данную ось.

Изменение концентрации в α и β -фазах при взаимной диффузии описывают следующие уравнения, полученные на основе второго закона Фика и уравнений (1):

$$\frac{\partial N_B}{\partial t} = \tilde{D}^n \left(\frac{\partial^2 N_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_B}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{V_m^n} \left(\frac{\partial N_B}{\partial x} + \frac{\partial N_B}{\partial y} \right)^2 \times \\ \times \left(-3\tilde{D}^n (\Omega_B^n - \Omega_A^n) + \Omega_B^n D_A^n - \Omega_A^n D_B^n \right) - v^n \left(\frac{\partial N_B}{\partial x} + \frac{\partial N_B}{\partial y} \right), \quad n = \overline{\alpha, \beta}, \quad (2)$$

где D_i^n – собственный коэффициент диффузии компонента i ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$).

Скорость движения межфазной границы определяется балансом потоков на самой границе и имеет следующий вид:

$$\frac{ds_n}{dt} = \left(-\tilde{D}^\beta \frac{\Omega_A^\beta}{(V_m^\beta)^2} \nabla N_B^\beta \Big|_{s+0} \cdot \vec{n} + \tilde{D}^\alpha \frac{\Omega_A^\alpha}{(V_m^\alpha)^2} \nabla N_B^\beta \Big|_{s-0} \cdot \vec{n} + \frac{N_B^\beta}{V_m^\beta} \cdot v^\beta \right) \times \\ \times \frac{1}{\frac{N_B^\beta}{V_m^\beta} - \frac{N_B^\alpha}{V_m^\alpha}}, \quad (3)$$

где $\frac{ds_n}{dt}$ – скорость движения межфазной границы $s(t)$ по нормали к ней,

$\vec{n} = \vec{n}(n_x, n_y)$ – единичный вектор нормали, $N_B^\alpha \equiv N_B(s(t)-0, t)$ и $N_B^\beta \equiv N_B(s(t)+0, t)$ – равновесные значения концентрации на межфазной границе.

Считаем, что левая граница образца остаётся неподвижной. Тогда будет происходить смещение правой границы $l(t)$, при этом:

$$\frac{dl_n}{dt} = -\tilde{D}^\beta \frac{\Omega_A^\beta}{V_m^\beta} \frac{1}{N_B^l} \nabla N_B^\beta \Big|_{x=l_x} \cdot \vec{n} + v^\beta. \quad (4)$$

Так как левая граница образца зафиксирована, то $v^\alpha = 0$, а v^β находим из уравнения:

$$v^{\beta} = \frac{1}{N_B^{\beta} - N_B^{\alpha}} \cdot \left(-\frac{\tilde{D}^{\beta}}{V_m^{\beta}} \nabla N_B^{\beta} \Big|_{s+0} \cdot \vec{n} \cdot \left(V_m^{\alpha} - \Omega_A^{\beta} - N_B^{\alpha} (\Omega_B^{\beta} - \Omega_A^{\beta}) \right) + \right. \\ \left. + \frac{\tilde{D}^{\alpha}}{V_m^{\alpha}} \nabla N_B^{\alpha} \Big|_{s-0} \cdot \vec{n} \cdot \left(\Omega_A^{\alpha} - V_m^{\beta} + N_B^{\beta} (\Omega_B^{\alpha} - \Omega_A^{\alpha}) \right) \right). \quad (5)$$

В соответствии с идеей построения данной модели, рассмотрим отдельный j -й диффузионный слой, в котором скорость движения межфазной границы необходимо спроектировать на ось Ox . Для этого приблизим границу $s(t)$ некоторой кривой, для которой построим уравнение нормали в явном виде. Зная уравнение нормали, находим: 1) координаты вектора \vec{n} для вычисления скорости движения границы; 2) угол между нормалью и осью Ox для вычисления проекции скорости на данную ось. Таким образом, в данной модели используются не сами скорости (3) – (5), а их проекции на ось Ox .

На границах образца поток компонентов отсутствует, поэтому граничные условия задаются следующим образом:

$$\frac{\partial N_B}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial N_B}{\partial x} \Big|_{x=l_x} = 0, \quad \frac{\partial N_B}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial N_B}{\partial y} \Big|_{y=l_y} = 0. \quad (6)$$

Для численного решения исходной задачи на каждом шагу по времени необходимо решать $R-1$ одномерную двухфазную задачу с подвижной межфазной границей, представляющую собой задачу Стефана. Среди различных численных методов решения задачи Стефана [8] нами был выбран метод выпрямления фронтов, предполагающий введение замены переменных в каждой j -ой задаче ($j = 1, R-1$). Таким образом, в каждом отдельном слое используется своя уникальная замена переменных. В результате такой замены исходная задача с подвижными границами сводится к задаче с фиксированными границами, которая решается методом конечных разностей. После получения решения на очередном временном слое следует вернуться к реальным переменным (x, y) . В итоге получается нерегулярная по оси Ox сетка, как представлено на рис. 2.

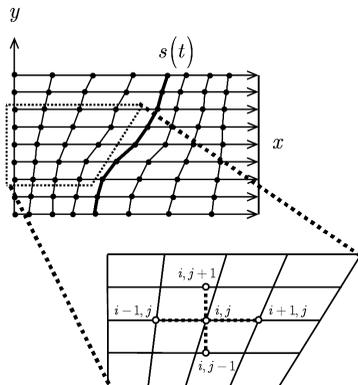


Рис. 2. Двумерная пространственная сетка

Следует заметить, что при вычислении концентрации на новом временном слое в (i, j) -ом узле необходимы значения концентрации в $(i, j-1)$ -ом и $(i, j+1)$ -ом узлах, которые не известны. Данные значения могут быть получены при помощи линейной интерполяции по двум узлам пространственной сетки, между которыми находится искомый узел.

Исследование движения межфазной границы. На основе предлагаемой квазидвумерной модели была реализована компьютерная модель движения межфазной границы в бинарной металлической системе $A-B$ с α - и β -фазами. Проведен ряд вычислительных экспериментов для проверки адекватности данной модели.

В ходе экспериментов было исследовано влияние следующих факторов на движение межфазной границы:

- 1) различие коэффициентов диффузии в соседних фазах;
- 2) различие парциальных мольных объёмов компонентов системы;
- 3) форма межфазной границы в начальный момент времени.

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование роста/угнетения фаз в системе $Cu-Sn$ с учётом парциальных мольных объёмов. В данной системе при температуре 473 К (200 °С) формируются две промежуточные фазы Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 . На рис. 3а представлен снимок поперечного сечения пары $Cu-Sn$, полученный при помощи сканирующего электронного микроскопа после 225 часов отжига.

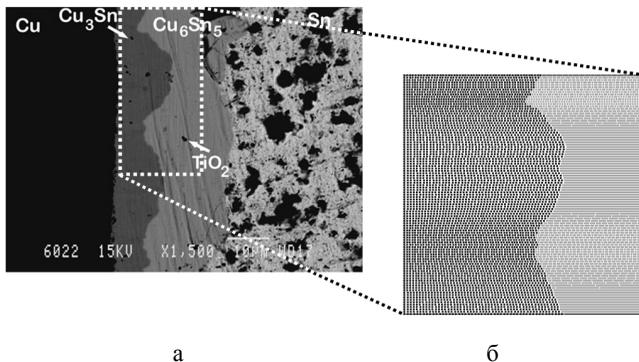


Рис. 3. Диффузионная зона бинарной системы $Cu - Sn$
 а – снимок из [9], б – моделируемый образец

На рис. 3б представлен моделируемый в работе двумерный образец с двумя фазами Cu_3Sn (слева) и Cu_6Sn_5 (справа) в начальный момент времени. При численном моделировании были использованы параметры из табл. 1.

Таблица 1
 Параметры бинарной системы $Cu - Sn$ при температуре 473 К

Коэффициенты диффузии ($m^2 \cdot c^{-1}$) [9]				Значения концентрации на границе [10]	
$D_{Cu}^{Cu_3Sn}$	$D_{Sn}^{Cu_3Sn}$	$D_{Cu}^{Cu_6Sn_5}$	$D_{Sn}^{Cu_6Sn_5}$	$N_{Sn}^{Cu_3Sn}$	$N_{Sn}^{Cu_6Sn_5}$
$3.53 \cdot 10^{-17}$	$1.21 \cdot 10^{-18}$	$8.77 \cdot 10^{-17}$	$2.37 \cdot 10^{-16}$	0.259	0.453

Были проведены два вычислительных эксперимента. В первом эксперименте, обозначенном (1), не учитывали различие парциальных мольных объемов компонентов. В следующем эксперименте (2), выбирали разные модельные значения парциальных мольных объемов, опираясь на значение V_m в данной фазе из [9]. Соответствующие данные приведены в табл. 2.

Таблица 2
 Значения парциальных мольных объемов ($cm^3 \cdot mоль^{-1}$)

Эксперимент	$\Omega_{Cu}^{Cu_3Sn}$	$\Omega_{Sn}^{Cu_3Sn}$	$\Omega_{Cu}^{Cu_6Sn_5}$	$\Omega_{Sn}^{Cu_6Sn_5}$	$V_m^{Cu_3Sn}$ [9]	$V_m^{Cu_6Sn_5}$ [9]
(1)	5.0	5.0	5.0	5.0		
(2)	8.65	8.4	10.74	10.5	8.59	10.59

Эволюция движения и формы межфазной границы представлена на рис. 4. Полученные результаты свидетельствуют, что со временем происходит уменьшение площади межфазной поверхности.

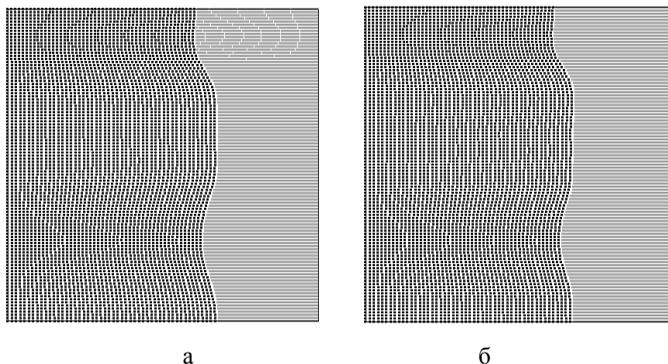


Рис. 4. Диффузионная зона системы $Cu - Sn$ при $t = 10$
а – эксперимент (1), б – эксперимент (2)

Кроме того, учитывая парциальные мольные объёмы компонентов системы $Cu - Sn$, в результате отжига наблюдали уменьшение всего объёма системы, см. рис. 4б.

Следует отметить, что изменение объёма системы вызывает возникновение внутренних напряжений, являющихся одной из основных причин появления трещин. Поэтому изучение поведения межфазной границы, а также изменения объёма системы имеет важное практическое значение.

Выводы. В работе предложена квазидвумерная модель движения межфазной границы с учётом парциальных мольных объёмов компонентов. Компьютерная реализация данной модели позволяет исследовать широкий класс бинарных металлических систем.

Результаты проведённых численных экспериментов демонстрируют влияние различия парциальных мольных объёмов на процессы роста/угнетения фаз и изменение объёма системы.

Список литературы: 1. Гольштейн М.И. Специальные стали: учебник для вузов / М.И. Гольштейн, С.В. Грачёв, Ю.Г. Векслер. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с. 2. Hickl J. Kinetics of phase layer growth during aluminide coating of nickel / J. Hickl, R.W. Heckel // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1975. – V. 6. – № 3. – P. 431-440. 3. Metin E. Solutions to Multiphase Diffusion in Binary Metal Interstitial Systems / E. Metin, O. Inal, A. Romig // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2005. – V. 36. – № 6. – P. 1407-1415. 4. Sauer F. Diffusion in binären gemischen mit volumenänderung / F. Sauer,

V. Freise // Z. Electrochem. – 1962. – V. 66. – P. 353-363. **5.** *Guy A.G.* Reference planes for binary diffusion with variable molar volume / *A.G. Guy* // Journal of Materials Science. – 1985. – V. 20. – P. 4317-4328. **6.** *Tsuji S.* Multiphase binary diffusion in infinite and semi-infinite Media: Part I. On the Determination of Interdiffusion Coefficients / *S. Tsuji* // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1994. – V. 25A. – P. 741-751. **7.** *Красношлык Н.А.* Моделирование многофазной диффузии в двухкомпонентном металлическом сплаве / *Н.А. Красношлык, А.О. Богатырев* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: научный журнал. – Харьков: Технологический центр. – 2011. – № 4/5 (52). – С. 60-63. **8.** *Красношлык Н.А.* Численное решение задач с подвижными межфазными границами / *Н.А. Красношлык, А.О. Богатырев* // Вісник Черкаського університету. Серія "Прикладна математика. Інформатика". – 2011. – Т. 194. – С. 16-31. **9.** *Paul A.* Diffusion Parameters and Growth Mechanism of Phases in the Cu-Sn System / *A. Paul, C. Ghosh and W.J. Boettinger* // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – V. 42. – № 4. – P. 952-963. **10.** *Onishi M.* Reaction-Diffusion in the Cu-Sn system / *M. Onishi, H. Fujibuchi* // Trans. JIM. – 1975. – V. 16. – P. 539-547.

Статью представил д.т.н., проф., заведуючий кафедрою прикладної математики Черкаського національного університету ім. Б. Хмельницького Головня Б.П.

УДК 004.942:539.219.3

Чисельне дослідження дифузійної конкуренції фаз на основі квазидвовимірної моделі / Красношлык Н.О., Богатырев О.О. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 113 – 120.

У роботі запропоновано квазидвовимірну математичну модель руху міжфазної границі у бінарній металевій системі з урахуванням різниці парціальних мольних об'ємів компонентів. Проведено чисельне моделювання процесів росту/пригнічення фаз в системі Cu-Sn. Іл.: 4. Табл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: парціальний мольний об'єм, дифузійна конкуренція фаз, міжфазна границя.

UDC 004.942:539.219.3

Numerical investigation of diffusion phase competition based on the quasi-two-dimensional model / Krasnoshlyk N.A., Bogatyrev A.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 113 – 120.

In this work quasi-two-dimensional mathematical model of movement of interphase boundary within metal binary system with regard to the difference of partial molar volumes of components is presented. Numerical simulations of growth/suppression phases in the Cu-Sn system are performed. Figs.: 4. Tabl.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: partial molar volume, diffusion phase competition, interphase boundary

Поступила в редакцію 30.07.2012

О.С. ЛОГУНОВА, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

Е.Г. ФИЛИППОВ, канд. ф.-м. наук, доц., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

В.В. ПАВЛОВ, ведущий инженер электросталеплавильной лаборатории, ОАО Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск

И.В. ПАВЛОВ, аспирант, ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск

ПОСТАНОВКА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Приведена стратегия постановки взаимосвязанных задач многокритериальной оптимизации состава шихты для дуговых печей. Выбор оптимального состава шихты позволяет снизить затраты при получении сталеплавильной продукции на следующих переделах. Ил.: 1. Библиограф.: 9 назв.

Ключевые слова: задача многокритериальной оптимизации, взаимосвязанные задачи, состав шихты для дуговых электросталеплавильных печей.

Постановка проблемы и анализ литературы. Выплавка стали в дуговых электросталеплавильных печах (ДСП) переменного тока в настоящее время нашла широкое применение на Российских и зарубежных предприятиях. Производства стали, выплавляемой в таких печах, постоянно возрастает и в 2012 году достигнет 23215,0 тыс. т, а в 2013 году – 24247,2 тыс. т [1], что составляет примерно 4,5 и 9% прироста по сравнению с выпуском электростали в 2011 году.

Увеличение объемов производства требует разработки новых научно-обоснованных технологий загрузки исходных шихтовых материалов, ведения плавки, доводки и непрерывной разливки стали [2 – 4]. Комплексная схема автоматизации металлургического предприятия включает систему блоков, относящихся к каждому переделу [5]. Каждый блок содержит входные параметры, которые позволяют оказать управляющее воздействие на протекание не только выбранного металлургического процесса, но и всей технологической цепочки получения непрерывно-литой заготовки (выплавка – доводка – разливка). Принятие решения о выборе режимов работы металлургических агрегатов должно базироваться на использовании автоматизированной системы оценки качества заготовки, позволяющей повысить достоверность и объективность получаемой информации [6].

В условиях ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" (ОАО "ММК") для выплавки стали в ДСП используется два вида сырья – металлический лом и жидкий передельный чугун. Формирование химического состава получаемого полупродукта во многом определяется составом металлического лома. Экспериментальное исследование химического состава металлического лома позволяет выявлять его структуру и процентное содержание хрома, никеля и меди, приносимых с ним в шихту (см. табл. 1).

Для получаемой стали выдвигаются требования по содержанию остаточных элементов в стали таких как хром, никель и медь, в зависимости от марки стали. Пример рекомендуемых значений процентного содержания химических элементов в стали, входящих в сортмент ОПО "ММК", приведен в табл. 2.

Таблица 1

Процентное содержание химических элементов, приносимых в шихту с металлическим ломом

Вид металлолома	Содержание элементов		
	[Cr], %	[Ni], %	[Cu], %
Полосовой и сортовой лом	0,10	0,15	0,15
Металлические конструкции	0,15	0,20	0,20
Тонкие трубы	0,30	0,15	0,25
Рельсы, накладки	0,15	0,20	0,25
Лом автомобильный	0,10	0,15	0,15

Таблица 2

Рекомендуемое процентное содержание химических элементов в сталях различного назначения

Назначение стали	Содержание элементов		
	[Cr], %	[Ni], %	[Cu], %
08Ю ВОВБ ГОСТ 9045*	0,02	0,04	0,04
Корд	0,05	0,05	0,05
Катанка ТУ 14-1-5317	0,1	0,1	0,15
Сталь по ГОСТ 380	0,3	0,3	0,3

*ВОВБ – весьма особо сложная вытяжка.

Эффективность математического описания технологических процессов в различных отраслях во многом определяется полнотой и корректностью постановки задачи [7]. Для задач, определяющих состав шихтовых материалов, на первое место выносятся проблемы оценки теплового и материального баланса при заданных соотношениях шихтовых материалов. Практически в таких исследованиях отсутствуют работы по постановке задач оптимизации и принятия решений в

многокритериальной среде. Авторами исследования была определена проблема определения процентного соотношения металлического лома и чугуна в шихте ДСП, а также структурного состава лома, при которых может быть достигнуто минимальное значение остаточных элементов в стали в пределах рекомендуемых значений.

Цель работы. Снижение затрат на получение стали заданной марки на основе выбора оптимального состава шихтовых материалов.

Особенности и допущения задачи многокритериальной оптимизации состава шихты. Сформулированную проблему можно определить как многокритериальную задачу оптимизации о смесях. Стратегия постановки задачи включает рассмотрение двух взаимосвязанных частей:

задача 1: определение массы металлического лома, подаваемого в ДСП, при которой будет достигнуто минимальное значение для процентного содержания хрома, никеля и меди в расплаве при наличии ограничений на суммарную массу лома и чугуна, определенную производственными возможностями ДСП;

задача 2: определение массовой структуры металлического лома (см. табл. 1), позволяющего получить минимальное содержание хрома, никеля и меди в общей массе лома при наличии ограничений на исходный и получаемый химический состав стали.

В качестве отличительных особенностей задачи можно указать, что:

– задачи являются многокритериальными, в которых в качестве целевой функции выступают: задача 1 – значения процентного содержания остаточных элементов в стали; задача 2 – значения массы вносимых остаточных элементов;

– определение параметров целевой функции выполняется на основе экспериментального исследования;

– выявление технологических параметров для записи уравнений и неравенств выполняется на основе проведения корреляционного анализа выбранных величин;

– система ограничений образует систему взаимосвязанных уравнений и неравенств, в которые зависимая величина может входить и как независимый фактор, и как зависимый признак.

Для решения указанных оптимизационных задач введем допущения:

– в постановке задачи рассматривается три остаточных элемента – хром, никель, медь, которые определяют наиболее важные потребительские свойства стали;

– в ходе экспериментального исследования зависимостей получены линейные формы для выбранных целевых функций и уравнений, и неравенств системы ограничений.

Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации состава шихты. Рассмотрим пример постановки задачи многокритериальной оптимизации для определения структурного состава металлического лома. Выполним все шаги постановки задачи согласно предлагаемой стратегии.

Этап 1 – постановка задачи по определению массы металлического лома и чугуна; процентного содержания серы, фосфора и кислорода в готовой стали; температуры металла на выпуске из ДСП, при которой возможно получение минимального процентного содержания остаточных элементов – хрома, никеля и меди.

Шаг 1.1. Введем обозначения независимых переменных и функций (см. табл. 3).

Таблица 3

Математические обозначения переменных и функций, принятые для задачи 1

Искомые переменные		Целевые функции	
Масса металлического лома, т	$m_{л}$	Содержание никеля, %	S_{Ni}
Масса чугуна, т	$m_{ч}$	Содержание хрома, %	S_{Cr}
Температура металла на выпуске, °C	T	Содержание меди, %	S_{Cu}
Содержание серы, %	S_S		
Содержание фосфора, %	S_P		
Содержание фосфора, %	S_{O_2}		

Шаг 1.2. Устанавливаем эмпирические зависимости для выбранных величин, образующих систему взаимозависимых уравнений:

$$\begin{cases} S_{Ni} = a_{11}m_{л} + a_{12}m_{ч} + \xi_1, \\ S_{Cu} = a_{21}m_{л} + a_{22}m_{ч} + \xi_2, \\ S_{O_2} = b_{31}S_{Ni} + a_{33}T + \xi_3, \\ S_S = b_{42}S_{Cu} + b_{45}S_P + b_{46}S_{Cr} + \xi_4, \\ S_P = b_{55}S_S + b_{56}S_{Cr} + \xi_5, \\ S_{Cr} = b_{62}S_{Cu} + b_{64}S_S + b_{65}S_P + \xi_6, \end{cases} \quad (1)$$

где $\{S_{Ni}, S_{Cu}, S_{O_2}, S_S, S_P, S_{Cr}\}$ – множество эндогенных переменных; $\{m_{л}, m_{ч}, T\}$ – множество экзогенных переменных; a_{ij} , ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$) – эмпирические коэффициенты для экзогенных переменных; b_{nm} ($n = 3, 6; m = 1, 2, 4, 5, 6$) – эмпирические коэффициенты для эндогенных

переменных; ξ_i ($\xi_k = \overline{1, 6}$) – эмпирический показатель, оценивающий влияние неучтенных факторов.

Шаг 1.3. Определяем вектор целевых функций на основании (1) и направление улучшения их значений:

$$\begin{aligned} S_{Ni} &= a_{11}m_{л} + a_{12}m_{ч} \rightarrow \min, \\ S_{Cu} &= a_{21}m_{л} + a_{22}m_{ч} \rightarrow \min, \\ S_{Cr} &= b_{62}S_{Cu} + b_{64}S_S + b_{65}S_P \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (2)$$

Шаг 1.4. Определяем ограничения для искомым переменных на основании существующих рекомендаций для каждого параметра:

$$\begin{cases} m^{\min} \leq m_{л} + m_{ч} \leq m^{\max}, & m_{л}^{\min} \leq m_{л} \leq m_{л}^{\max}, \\ m_{ч}^{\min} \leq m_{ч} \leq m_{ч}^{\max}, & T^{\min} \leq T \leq T^{\max}, \\ S_{O2}^{\min} \leq S_{O2} \leq S_{O2}^{\max}, & S_S^{\min} \leq S_S \leq S_S^{\max}, \\ S_P^{\min} \leq S_P \leq S_P^{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где для параметров $\{S_{O2}, S_S, S_P\}$ – используются выражения из (1).

Таким образом, математическая постановка задачи 1 включает: три целевые функции (2) и систему ограничений (3).

Этап 2 – постановка задачи по определению структуры металлического лома для массы, определенной в задаче 1, позволяющей получить минимальную массу хрома, никеля и меди в заданном объеме расплава.

Шаг 2.1. Введем обозначения независимых переменных и функций. Пусть общий объем металлического лома $m_{л}$, определенный в задаче 1, формируется на основе n структурных частей, каждая из которых имеет массу m_j , где $j = 1, 2, \dots, n$. Каждая структурная часть вносит соответствующую долю (a_{ij}), где $i = 1, 2, 3$ и $j = 1, 2, \dots, n$, хрома ($i = 1$), никеля ($i = 2$) и меди ($i = 3$) в общую массу остаточных элементов. Масса остаточных элементов определяется переменными $m_{[Cr]}$, $m_{[Ni]}$, $m_{[Cu]}$.

Шаг 2.2. Определяем форму целевых функций:

$$\begin{aligned} m_{Cr} &= a_{11}m_1 + a_{12}m_2 + \dots + a_{1n}m_n \rightarrow \min, \\ m_{Ni} &= a_{21}m_1 + a_{22}m_2 + \dots + a_{2n}m_n \rightarrow \min, \\ m_{Cu} &= a_{31}m_{л} + a_{32}m_{ч} + \dots + a_{3n}m_n \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4)$$

Шаг 2.3. Выстраиваем систему ограничений для независимых переменных:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n m_j = m_{\text{л}}, \\ m_j \geq 0, j = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, для определения массовой структуры металлического лома получили каноническую многокритериальную задачу на минимум. Общую стратегию постановки и решения задачи оптимизации состава шихтовых материалов для ДСП можно отобразить в графическом виде, представленном на рис.

Пример постановки задачи для стали марки 08Ю ВОВВ по ГОСТ 9045. Приведем формальную постановку задачи согласно приведенной стратегии для экспериментальных данных, полученных в условиях ОАО "ММК" для ДСП 1 в период исследований, проведенных в 2011 году. Для записи системы ограничений использованы практические рекомендации и технологические инструкции, принятые на указанном предприятии. Результаты постановки задачи для стали марки 08Ю ВОВВ по ГОСТ 9045 (см. табл. 2) при условии использования пяти видов шихтовых материалов (см. табл. 1) имеют следующий вид.

Задача 1.

Требуется определить кортеж $(m_{\text{л}}, m_{\text{ч}}, T, S_{O_2}, S_S, S_P)$ такой, чтобы

$$\begin{aligned} S_{Ni} &= 0,000048m_{\text{л}} - 0,000519m_{\text{ч}} + 0,1102 \rightarrow \min, \\ S_{Cu} &= 0,000175m_{\text{л}} - 0,001m_{\text{ч}} + 0,19804 \rightarrow \min, \\ S_{Cr} &= -0007994S_{Cu} + 0,9592S_S + 1,6385S_P + 0,0018 \rightarrow \min \end{aligned}$$

при наличии системы ограничений:

$$\begin{cases} 150 \leq m_{\text{л}} + m_{\text{ч}} \leq 210, & 90 \leq m_{\text{л}} \leq 200, \\ 10 \leq m_{\text{ч}} \leq 150, & 1590 \leq T \leq 1670, \\ 0,355 \leq S_{O_2} \leq 2,827, & 0,019 \leq S_S \leq 0,055, \\ 0,003 \leq S_P \leq 0,021, \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} S_{O_2} &= 0,736S_{Ni} + 0,001443T - 2,3108, \\ S_S &= 0,1174S_{Cu} + 1,4977S_P + 0,197S_{Cr} + 0,00154, \\ S_P &= 0,1717S_S + 0,08559S_{Cr} - 0,00302. \end{aligned}$$

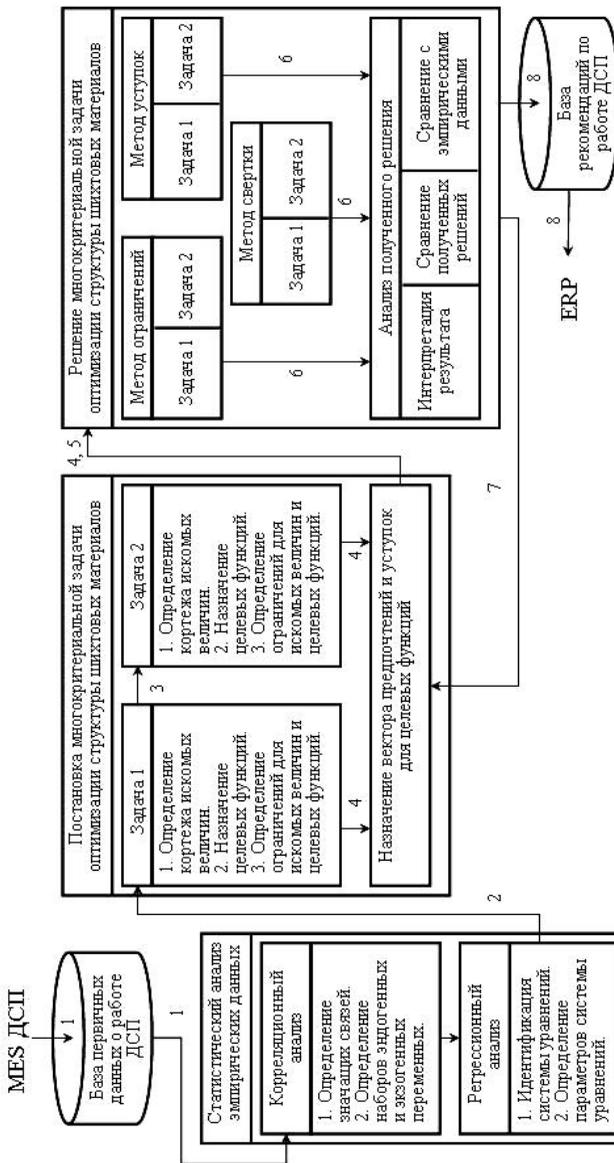


Рис. Стратегия постановки задачи для оптимизации состава шихты в ДСП: 1 – поток первичных эмпирических данных; 4 – поступающих с полевой шихты; 2 – система эмпирических взаимосвязанных уравнений; 3 – кортеж связывающих параметров; 4 – математическая модель многокритериальной задачи оптимизации; 5 – кортеж услуг и весовых коэффициентов; 6 – значения искомым параметров и целевых функций; 7 – кортеж расогласований; MES – система управления технологическим процессом; ERP – система планирования производства

Задача 2.

Требуется определить кортеж $(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5)$ такой, чтобы

$$\begin{aligned}m_{Cr} &= \frac{0,1}{100}m_1 + \frac{0,15}{100}m_2 + \frac{0,3}{100}m_3 + \frac{0,15}{100}m_4 + \frac{0,1}{100}m_5 \rightarrow \min, \\m_{Ni} &= \frac{0,15}{100}m_1 + \frac{0,2}{100}m_2 + \frac{0,25}{100}m_3 + \frac{0,25}{100}m_4 + \frac{0,15}{100}m_5 \rightarrow \min, \\m_{Cu} &= \frac{0,15}{100}m_1 + \frac{0,2}{100}m_2 + \frac{0,15}{100}m_3 + \frac{0,2}{100}m_4 + \frac{0,15}{100}m_5 \rightarrow \min\end{aligned}$$

при наличии системы ограничений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 m_j = m_n, \\ m_j \geq 0, j = \overline{1, n}, \end{cases}$$

где m_n является решением предыдущей задачи 1.

Деление коэффициентов системы на 100 необходимо для перевода процентов в массовую долю элементов.

Предложенная цепочка задач многокритериальной оптимизации состава шихтовых материалов может быть решена методами, приводящими многокритериальную задачу к однокритериальной, такими как метод ограничений, метод уступок и метод свертки. Каждый из приведенных методов преобразования задачи приводит к назначению вектора весовых коэффициентов или уступок на основе экспертных оценок [8, 9]. Такое априорное назначение этих векторов приводит к необходимости проведения исследования полученных решений на соответствие эмпирической информации.

Заключение. Таким образом, в представленной работе авторами

– разработана стратегия математической постановки задачи многокритериальной оптимизации формирования структуры шихтовых материалов для выплавки стали в ДСП, отличающаяся от ранее известных подходов гибкостью, универсальностью и общностью расширения списка целевых функций и системы ограничений;

– представлено комплексное использование эмпирической и аналитической информации для задачи многокритериальной оптимизации, которое делает возможным автоматизировать постановку многокритериальных задач при разработке имитационных программных продуктов;

– продемонстрировано применение стратегии постановки задачи для одной из наиболее часто выплавляемой марки стали в сортаменте ОАО "ММК".

Список литературы: 1. Черная металлургия России // Анализ и прогноз производства товарных групп, 2010. – Вып. 1. – С. 34 – 39. 2. Тулуевский Ю.Н. Анализ базовых концепций и пути повышения эффективности работы ДСП с непрерывной загрузкой лома / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров // Сталь. – 2012. – № 6. – С. 24 – 29. 3. Родионова И.Г. Влияние примесей на степень твердорастворного упрочнения проката из низкоуглеродистой стали / И.Г. Родионова, П.А. Мишнев, Ю.С. Быкова, Р.Р. Адигамов, Т.М. Ефимова // Сталь. – 2012. – № 6. – С. 62 – 67. 4. Носов С.К. Теоретическая база, современные технологии и инновации черной металлургии / С.К. Носов, А.В. Роштин, В.Е. Роштин, Б.П. Черняховский // Электрометаллургия. – 2012. – № 4. – С. 2 – 11. 5. Matsko I.I. Forecasting of image processing time using deterministic methods / I.I. Matsko, O.S. Logunova // International Journal of Applied Physics and Mathematics, Vol. 2, No. 3, May 2012. – P. 172 – 174. 6. Логунова О.С. Автоматизированная оценка качества непрерывно-литой заготовки / Логунова О.С., Б.Н. Парсункин, В.Г. Суспицын // Сталь. – 2004. – № 12. – С. 101 – 104. 7. Логунова О.С. Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации теплового состояния непрерывно-литой заготовки / О.С. Логунова, И.В. Осипов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 9. – С. 39 – 42. 8. Исследование операций в экономике: Учебн. пособие для вузов / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путько, И.М. Тришин, М.Н. Фридман. Под ред. проф. Н.Ш. Кремера. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. – 407 с. 9. Кузнецов Ю.Н. Математическое программирование / Ю.Н. Кузнецов, В.И. Кузубов, А.Б. Волощенко. – М.: Высшая школа, 1985. – 302 с.

УДК 681.142.2:621.746

Постановка взаємопов'язаних завдань багатокритеріальної оптимізації складу шихти для дугових електросталеплавильних печей / Логунова О.С., Филиппов Е.Г., Павлов В.В., Павлов І.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 121 – 129.

Наведено стратегія постановки взаємопов'язаних задач багатокритеріальної оптимізації складу шихти для дугових печей. Вибір оптимального складу шихти дозволяє знизити витрати при отриманні сталеплавильної продукції на наступних переділах. Лл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: задача багатокритеріальної оптимізації, взаємопов'язані завдання, склад шихти для дугових електросталеплавильних печей.

UDC 681.142.2:621.746

Statement of related problems of the charge multiobjective optimization for electric arc furnace / Logunova O.S., Filippov E.G., Pavlov V.V., Pavlov I.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 121 – 129.

Shows the strategy formulation of related problems of multiobjective optimization of the charge for electric arc furnaces. Selection of the optimal composition of the charge reduces the cost in obtaining the steel products in the following stages. Figs.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: problem of multiobjective optimization, related problems, the strategy formulation of the problem of optimization materials for electric arc furnace.

Поступила в редакцію 15.07.12

А.В. ЛЯХОВЕЦ, м.н.с., ХНУРЭ, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЗНАЧЕНИЯ k ПРИ ПОСТРОЕНИИ k -*nn* ГРАФА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫБОРКИ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ХАМЕЛЕОН

В статье представлены результаты анализа и экспериментов применения различных характеристик множества для выявления зависимости значения k при построении k -*nn* графа от выделенных характеристик выборки. Данная зависимость будет применена в модифицированном алгоритме Хамелеон для ускорения работы алгоритма на этапе построения графа и улучшения качества кластеризации посредством этого ускорения.

Ключевые слова: характеристики выборки, k -*nn* граф, алгоритм Хамелеон, построение графа, кластеризация. Библиогр.: 8 назв.

Постановка проблемы и анализ литературы. На данный момент весьма активно исследуются различные методы кластеризации. В последнее время ведутся активные разработки новых алгоритмов кластеризации, способных обрабатывать сверхбольшие базы данных. В них основное внимание уделяется масштабируемости, так как во многих областях за последнее десятилетие существенно выросли объемы данных.

Из анализа работ [1 – 3] можно сделать вывод, что к наиболее актуальным алгоритмам относятся: *BIRCH*, *CURE*, *CHAMELEON*, *ROCK*. В работах [4, 5] более детально описан алгоритм Хамелеон и его применение для кластеризации больших объемов данных [6]. Но на данный момент все еще не решена проблема быстродействия при кластеризации больших объемов данных. Быстродействие алгоритма Хамелеон в целом может быть улучшено посредством повышение скорости работы его на отдельных этапах.

Цель работы – повышение скорости построения графа в алгоритме Хамелеон посредством определения значения k на основании характеристик анализируемых данных.

Описание модифицированного алгоритма Хамелеон. Хамелеон – это новый иерархический алгоритм, который преодолевает ограничения существующих алгоритмов кластеризации. Данный алгоритм рассматривает динамическое моделирование в иерархической кластеризации [7].

В алгоритме можно выделить следующие этапы: построение графа, округление, разделение, восстановление и улучшение [8].

Хамелеон представляет объекты посредством часто используемого графа k -ближайших соседей (k -nearest neighbor graph).

Создание экспериментальных выборок. Для проверки влияния той или иной характеристики выборки на значение k необходимо большое количество выборок. Отсутствие реального источника данных требуемого объема, разнообразия и качества вынуждает обратиться к альтернативному источнику [9]. В данной работе создание 3D фигур выполняется посредством 3D s max studio. Данное приложение позволяет сгенерировать трехмерную фигуру необходимой плотности и с необходимым количеством точек. Далее фигура может быть экспортирована. Статистические характеристики полученной выборки будут зависеть от характера фигур, их размера, плотности и расположения. Данные параметры подбираются при создании фигур. Добавление шума в выборку производится непосредственно перед проведением анализа. Выборки анализировались в 4 состояниях: без добавления шума, с добавлением 20 %, 40 % и 60 % шума.

Были использованы 54 выборки при проведении эксперимента.

Определение k при построении k -nn графа. При решении поставленной задачи построения графа k должно быть выбрано таким образом, чтобы соблюдалось условие связности построенного графа. Граф называется связным, если в нем для любых двух вершин имеется маршрут, соединяющий эти вершины. На практике применяется два принципиально различных порядка обхода, основанных на поиске в глубину и поиске в ширину соответственно.

Рассмотрим итеративные алгоритмы и алгоритмы, реализованные с помощью рекурсии [10].

В худшем случае (при полном графе) рекурсивный алгоритм, перебирая все возможные ребра, будет вынужден вызвать основную процедуру $(N-1)!$ раз. Велика вероятность, что при достаточно большом N произойдет переполнение оперативной памяти, которое вызовет ошибку. Кроме того, размеры квадратной матрицы смежности дают сильное ограничение на возможное количество вершин графа: не более 250.

Итеративный же алгоритм переберет все ребра графа, которых может быть не более чем $\frac{N \times (N+1)}{2}$. Следовательно, общая сложность алгоритма может быть приблизительно оценена значением $N^3/8$. Возможное количество вершин графа ограничено только максимальным размером линейного массива (32 000).

Значение k последовательно увеличивается, пока граф не станет связным. Так как данная операция трудоемка и длительна, она нуждается в оптимизации.

Анализ различных характеристик выборок. Для оптимизации выбора начального параметра k при построении k -nn графа необходимо построить математическую модель зависимости k от характеристик обрабатываемой выборки. Математическая модель будет построена на основе исследования 30 выборок.

Математической моделью называется совокупность математических соотношений, уравнений, неравенств, описывающих основные закономерности, присущие изучаемому процессу, объекту или системе.

Будем считать, что зависимости между параметрами задаются в виде следующего набора функций (1):

$$W_i = F(X_1, X_2, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_k), \quad i = (\overline{1, m}), \quad (1)$$

где W_i – обозначения целевых параметров; X_q ($q = \overline{1, n}$) – обозначения управляемых параметров; a_p ($p = \overline{1, r}$) – обозначения неуправляемых параметров; m – число целевых параметров; n – число управляемых параметров, значения которых можно выбирать в технически допустимых пределах и тем самым влиять на процесс моделирования; r – число неуправляемых параметров.

Так как построенная математическая модель должна отображать зависимость между начальным значением параметра k при построении k -nn графа и характеристиками выборки, то в соответствии с формулой (1) целевым параметром является значение k , а вычисляемые характеристики выборки являются управляемыми параметрами.

Целью данных экспериментов был выбор управляемых параметров данной модели, способных отобразить необходимые характеристики выборки данных. В рамках работы было проведено 3 эксперимента для выбора управляемых параметров.

1. В первом эксперименте анализировались такие характеристики как количество объектов в выборке, минимальные и максимальные значения матожидания, дисперсии и разброса. Зависимости между данными параметрами и значением k не выявлено [3].

2. Во втором эксперименте в качестве управляемого параметра были выбраны длина наибольшего остовного ребра полносвязного графа и среднее значение длины всех остальных ребер остова. Данные характеристики показывают зависимость, но использование этого

подхода не является целесообразным в связи с трудоемкостью построения остова полносвязного графа.

3. В третьем эксперименте в качестве характеристики использовались количество объектов в выборке и максимальное расстояние между компонентами связности за вычетом средних значений. Данные характеристики нетрудоемки в расчете и существует зависимость между ними и значением k . Наличие такой зависимости позволит построить математическую модель расчета параметра k для ускорения построения графа в модифицированном алгоритме Хамелеон. Уменьшение времени работы на этапе построения графа сократит общее время работы алгоритма.

Выводы. Характеристики, основанные на компонентах связности, могут быть использованы для построения математической модели зависимости k от характеристик выборки. Полученные результаты будут использованы для дальнейших исследований и модификаций алгоритма Хамелеон.

Список литературы: 1. Чубукова И.А. Data Mining / И.А. Чубукова. – БИНОМ. Лаборатория знаний, Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру, 2008. – С. 384. 2. Hein M. Similarity Graphs in Machine Learning MLSS / M. Hein, U. Luxburg // Practical Session on Graph Based Algorithms for Machine Learning August 2007. – P. 22. 3. Liu H. Modeling and Data Mining in Blogosphere / H. Liu, N. Agarwa // Synthesis Lectures on Data Mining and Knowledge Discovery Paperback. Jul 30, 2009. – P. 109. 4. Karypis G. Chameleon: Hierarchical Clustering Using Dynamic Modeling / G. Karypis, E.S. Han, V. Kumar // Computer. – 1999. – Vol. 32. – № 8 – P. 68-75. 5. Бувайло Д.П. Быстрый высокопроизводительный алгоритм для разделения нерегулярных графов / Д.П. Бувайло, В.А. Толок // Вісник Запорізького державного університету – 2002 – № 2. – С. 47-53. 6. Кузнецов Д.Ю. Кластерный анализ и его применение / Д.Ю. Кузнецов, Т.Л. Трошина // Ярославский педагогический вестник. – 2006. – №. 4. – С. 103 107 7. Ляховец А.В. Исследование эффективности динамической кластеризации линейнонеразделимых зашумленных данных / А.В. Ляховец, Н.С. Лесная, Т.Б. Шатовская // Научно технический журнал "Системы обработки информации". – 2010 – 5 (86) – С. 86-91. 8. Agarwal P. Challenges and Tools of Clustering Algorithms / P. Agarwal, A.M. Afshar, R. Biswas // IJCSI International Journal of Computer Science Issues – 2011 – Vol. 8, Issue 3. – №. 2. – P. 79-81. 9. Коришонов Ю.М. Получение многомерной статистической выборки с заданными корреляционными свойствами / Ю.М. Коришонов // Вестник РГРТУ. – 2008 – №.23. 10. SPARCL: Efficient and Effective Shape-Based Clustering / V. Chaoji, M.A. Hasan, S. Salem, M.J. Zaki // In Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2008), December 15-19, 2008, Pisa, Italy. IEEE Computer Society – P. 93-102.

Статью представил д.т.н., проф. ХНУРЭ Четвериков Г.Г.

УДК 519.7:007:004

Дослідження залежності значення k при побудові k -пл графу від різних характеристик вибірки для модифікації алгоритма Хамелеон. / Ляховець А.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 130 – 134.

У роботі представлено результати аналізу та експериментів що до використання різних характеристик множини для визначення залежності значення k при побудові k - nn графу від обраних характеристик. Ця залежність буде використана у модифікованому алгоритмі Хамелеон для прискорення роботи алгоритму на етапі побудови графу та через це, прискорення та поліпшення якості кластеризації.

Ключові слова: характеристики вибірки, k - nn граф, алгоритм Хамелеон, побудова графу, кластеризація. Бібліогр.: 10 назв.

UDC 519.7:007:004

Research of dependency k while k - nn graph building from different data set characteristics for Khameleon algorithm modification. / Lyakhovets A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 130 – 134.

In the article research and analysis results are presented. The main point was to use different data set characteristics for finding dependence between k value which is used for k - nn graph build and this characteristics. This dependence will be used in modification of Chameleon algorithm for graph build stage acceleration and by this, clustering acceleration and quality improvement. Refs.: 10 titles.

Keywords: dataset characteristics, k - nn graph, Chameleon algorithm, graph build, clustering.

Поступила в редакцію 18.07.2012

И.И. МАЦКО, аспирант, ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова",
Магнитогорск,

О.С. ЛОГУНОВА, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО "МГТУ
им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

В.В. ПАВЛОВ, ведущий инженер, ОАО "Магнитогорский
металлургический комбинат", Магнитогорск,

О.С. МАЦКО, магистр, ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова",
Магнитогорск

АДАПТИВНОЕ НЕЧЕТКОЕ ДЕРЕВО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ¹

В работе представлены результаты построения адаптивного нечеткого дерева принятия решения с динамической структурой для автоматизированной системы управления производством непрерывнолитой заготовки. Выполнено описание структуры, математического представления, алгоритмов адаптации и динамики структуры. Ил.: 4, Табл.: 1, Библиограф.: 10 назв.

Ключевые слова: адаптивное нечеткое дерево принятия решений с динамической структурой, автоматизированная система управления производством.

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время активно развиваются системы автоматизированного принятия решений для сложных многостадийных производственных процессов [1, 2]. Сложность этих процессов требует организации каскадной схемы управления с передачей значений параметров от одного этапа производства к другому. К многостадийному производству можно отнести технологию получения непрерывнолитой заготовки, которая включает: выплавку стали, доводку стали и непрерывную разливку. Несмотря на большое количество работ в области исследования указанных технологических процессов, остаются актуальными проблемы [3]:

- наличие обратной информационной связи только с организационными структурами производства, которые не способны оказывать воздействие на технологию производства;
- отсутствие в существующей системе управления алгоритмов, позволяющих выполнить актуальный мониторинг за изменениями

¹ Научные исследования выполняются при финансовой поддержке грантов Правительства Челябинской области (2011 и 2012 гг.) и ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

технологии в течение одной серии на основе информации, собранной в едином Хранилище данных;

– отсутствие алгоритмов принятия решения на основе технологической информации о протекании процессов и качестве получаемой продукции.

Показателем стабильности проведенной серии плавок является качество получаемой продукции. Под качеством продукции в работе понимается степень развития внутренних макродефектов заготовки. Формирование макродефектов происходит за счет факторов, оказывающих воздействие на жидкий металл или затвердевающую заготовку на всех стадиях производства. Среди таких факторов можно указать структуру используемого сырья (соотношение шихтовых материалов для сталеплавильных печей), температуру металла на выходе из печи, содержание химических элементов в стали, скорость вытягивания заготовки, расходы охладителей и т.п. [4]. Построение многофакторных зависимостей для прогнозируемого качества продукции является нецелесообразным, так как они будут содержать факторы, не имеющие количественного представления; имеющие разную природу и различающиеся по диапазону значений в сотни и тысячи раз и т.п. Кроме того, увеличение размерности эмпирической модели не ведет к увеличению точности предсказания результата [5].

В настоящее время разработаны теории, методы и методики, позволяющие выполнить принятие решений в сложных процессах на основе деревьев. Преимуществами методов принятия решений на основе древовидных структур являются [6, 7]: быстрый процесс обучения; генерация правил в областях, в которых эксперту трудно формализовать свои знания; интуитивно понятная классификационная модель; стабильное функционирование метода при нарушении первоначальных предположений, включенных в модель; возможность обработки большого объема информации без специальных подготовительных процедур; высокая вычислительная масштабируемость.

Цель статьи – разработка адаптивного нечеткого дерева с динамической структурой для принятия решений в АСУ производством непрерывнолитой заготовки.

Объектом исследования является технологическая цепочка производства непрерывнолитых заготовок, которая включает электродуговые сталеплавильные печи, установки печь-ковш, машины непрерывного литья заготовок радиального и криволинейного типов, функционирующие в условиях электросталеплавильного цеха ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат".

В качестве предмета исследования определено информационное, математическое и программное обеспечение второго уровня АСУ производством непрерывнолитых заготовок.

Структура адаптивного нечеткого дерева с динамической структурой. Для организации обратной связи в АСУ производства непрерывнолитой заготовки разработано адаптивное нечеткое дерево принятия решений с динамической структурой. Цель построения древовидной структуры состоит в определении траектории передачи управления на каждый этап производства непрерывнолитой заготовки. Учитывая, что каждый из видов дефектов может формироваться на каждом из этапов производства с разной вероятностью, было принято решение о построении нечеткого дерева принятия решений.

Атрибутами дерева являются значения метрологических параметров агрегатов в технологической цепочке. Перечень используемых параметров приведен в табл.

Таблица

Перечень атрибутов, определяющих структуру адаптивного нечеткого дерева с динамической структурой

Агрегат	Атрибут	Диапазон
Дуговая сталеплавильная печь	Содержание химических элементов в шихтовых материалах, %	Доли процента
	Содержание химических элементов в стали после выпуска, %	Доли процента
	Масса кусковых ферросплавов, кг	250 – 4500
	Масса добавочных материалов, кг	5000 – 10000
	Масса углеродсодержащего материала, кг	100 – 1500
	Масса жидкого чугуна в заливочном ковше, т	10 – 80
Установка печь-ковш	Содержание химических элементов в стали, %	Доли процента
	Температура металла после доводки, °С	1500 – 1700
	Расход аргона на продувку, м ³ /ч	0 – 72
	Масса введенной алюминиевой катанки, кг	1 – 1500
Машина непрерывного литья заготовок	Температура металла в промежуточном ковше, °С	1480 – 1600
	Скорость вытягивания заготовки, м/мин	1 – 5
	Расход воды на широких стенках кристаллизатора, м ³ /мин	4,8 – 5,5

Математическая основа адаптивного нечеткого дерева принятия решения с динамической структурой. Для построения деревьев принятия решений в работе используется широко распространенный алгоритм С4.5 [8, 9]. Основой адекватного принятия решений нечеткими деревьями являются функции принадлежности к значениям каждого атрибута. Авторами предлагается для построения функций принадлежности вышеописанных атрибутов использовать знания экспертов. На рис. 1 приведен график функции принадлежности размеров дефектов к трем значениям.

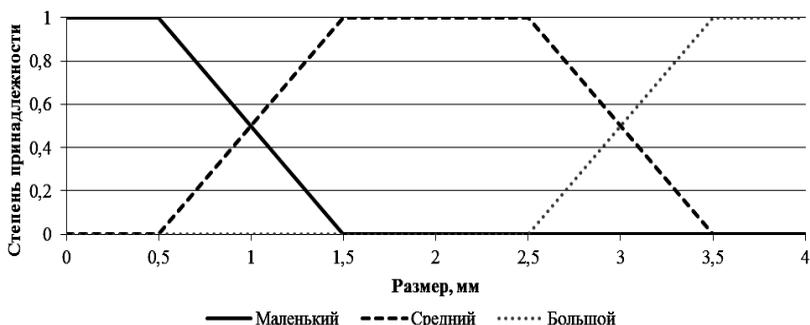


Рис. 1. Графики функций принадлежности размеров дефектов

После построения нечеткого дерева принятий решений по алгоритму С4.5 с помощью функций принадлежности и обучающих примеров выполняется обрезание ветвей, которые ведут к ошибочным решениям, и тестирование полученного дерева на правильность принятия решений [10]. Тестирование проводится по эталонной выборке примеров.

Алгоритмы адаптации и динамики структуры нечеткого дерева принятия решений. После каждого оценивания макроструктуры непрерывнолитых заготовок исходные данные, формирующие дерево, дополняются новой информацией, на основе которой проводится адаптация расчетных значений параметров модели дерева (рис. 2).

В связи с изменением параметров модели дерево может изменить свою структуру. После изменений дерево проходит тест на адекватность. Полученное дерево лучше адаптируется к условиям скорректированной технологии. Динамичность структуры позволяет иметь представление о реальной значимости каждого атрибута в процессе получения непрерывнолитых заготовок.



Рис. 2. Алгоритм дообучения и перестройки адаптивного нечеткого дерева принятия решений с динамической структурой

Пример возможной иерархии адаптивного нечеткого дерева принятия решений с динамической структурой приведен на рис. 3.

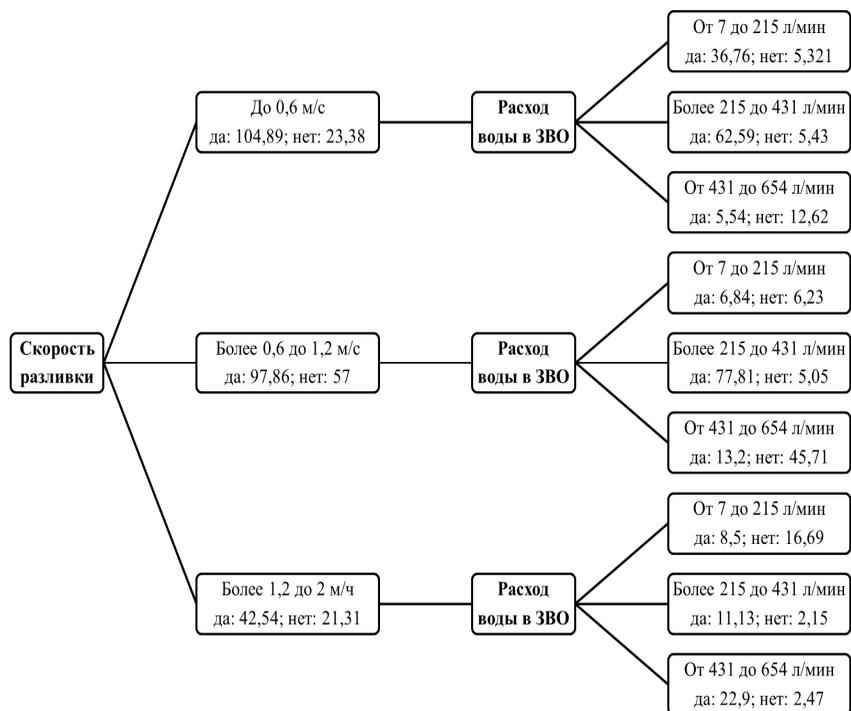


Рис. 3. Часть иерархии адаптивного нечеткого дерева принятия решения с динамической структурой

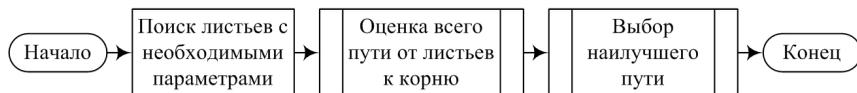


Рис. 4. Алгоритм выбора параметров в адаптивном нечетком дереве принятия решений с динамической структурой

Заключение. Таким образом, в представленной работе авторами:

- доказана необходимость организации обратной связи с АСУ производства непрерывнолитой заготовки, позволяющей корректировать технологию серийного производства в реальном времени;
- определена структура адаптивного нечеткого дерева принятия решений с динамической структурой, учитывающей состав доступного метрологического обеспечения, с помощью которого можно оказать управляющее воздействие на протекающий процесс;
- разработаны алгоритмы адаптации и динамики древовидной структуры принятия решения, позволившие выполнить программную реализацию модуля для блока-решателя каскадной системы автоматизированного управления производством непрерывнолитой заготовки.

Список литературы: 1. *Спирин Н.А.* Информационные системы в металлургии: Конспект лекций / *Н.А. Спирин, В.В. Лавров.* – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2004. – 495 с. 2. *Бобровский Д.* Введение в теорию динамических систем с дискретным временем / *Д. Бобровский.* – СПб.: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. – 360 с. 3. *Логунова О.С.* Системный подход к исследованию информационных потоков при управлении качеством продукции / *О.С. Логунова* // Проблемы теории и практики управления. – 2008. – № 6. – С. 56 – 63. 4. *Логунова О.С.* Исследование качественных зависимостей образования внутренних дефектов и теплового состояния непрерывнолитой заготовки / *О.С. Логунова* // Сталь. – 2008. – № 10. – С. 60 – 63. 5. *Львовский Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для втузов / *Е.Н. Львовский.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1998. – 239 с. 6. *Hastie T.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction / *T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman.* – New York: Springer Science + Business Media, 2009. – 746 с. 7. *Шахиди А.* Деревья решений – общие принципы работы / *А. Шахиди* // Режим доступа: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/tree/description/> 8. *Quinlan J.R.* C4.5: Programs for Machine Learning / *J.R. Quinlan* // San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. – 302 с. 9. *Janikow C.Z.* Fuzzy Decision Trees: Issues and Methods / *C.Z. Janikow* – IEEE Trans Syst Man Cybern, 1998. – P. 1 – 14. 10. *Берестнева О.Г.* Построение логических моделей с использованием деревьев решений / *О.Г. Берестнева, Е.А. Муратова* // Известия Томского политехнического университета, 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 154 – 160.

УДК 621.746.047-52

Адаптивне нечітке дерево прийняття рішень з динамічною структурою для автоматизованої системи управління виробництвом безперервнолитих заготовок / Мацько І.І., Логунова О.С., Павлов В.В., Мацько О.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – №. 62 (968). – С. 135 – 141.

В роботі представлені результати побудови адаптивного нечіткого дерева прийняття рішення з динамічною структурою для автоматизованої системи управління виробництвом

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

безперервної заготовки. Виконано опис структури, математичного подання, алгоритмів адаптації та динаміки структури. Іл.: 4., Табл.: 1. Бібліограф.: 10 назв.

Ключові слова: адаптивне нечітке дерево прийняття рішень з динамічною структурою, автоматизована система управління виробництвом.

UDC 621.746.047-52

Adaptive fuzzy decision tree with a dynamic structure for the automated control system of the production of continuously cast billets / Matsko I.I., Logunova O.S., Pavlov V.V., Matsko O.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 135 – 141.

The paper presents the results of constructing an adaptive fuzzy decision tree with a dynamic structure for the automated control system of the production of billets. Completed description of the structure, mathematical representation, algorithms for adapting and dynamics of the structure. Figs.: 4. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: adaptive fuzzy tree with a dynamic structure, decision tree, an automated production control system.

Поступила в редакцію 27.07.2012

УДК 629.42

В.И. НОСКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

Разработана тепловая модель тягового двигателя тепловоза 2ТЭ116, построенная на основных принципах теории нагревания однородного твердого тела.

Полученная модель позволяет проводить исследования теплового состояния тягового двигателя для различных условий эксплуатации и создать систему регулируемого охлаждения. Ил.: 6. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: тепловая модель, тяговый двигатель, регулируемое охлаждение.

Постановка проблемы и анализ литературы. Необходимость создания тепловой модели для анализа процессов, протекающих в системе охлаждения тягового двигателя (ТД), обусловлена тем, что интенсивность теплоотдачи в основном зависит от номера позиции контроллера машиниста (КМ), а следовательно, и от потерь мощности в двигателе, и от скорости движения. Установлено, что необходимость в принудительном охлаждении ТД возникает в основном на высоких позициях КМ, или при длительном нахождении на средних позициях. Однако, большую часть времени тепловоз эксплуатируется либо в режиме холостого хода, или при низких позициях КМ. Проблемами математического моделирования тепловых процессов в электрических машинных занимались многие ученые: Алексеев А.Е., Данько В.Г., Иоффе А.Б., Космодамианский А.С., Костенко М.П., В.Д., Некрасов О.А., Рапопорт О.Л., Филиппов И.Ф., Щербаков В.В., Яковлев А.И. и др. [1 – 8]. В трудах этих ученых разработаны достоверные методы расчета тепловых полей в электрических машинах в установившихся и переходных режимах работы, позволяющие производить тепловые расчеты с высокой точностью. Тем не менее, использование на тепловозе предлагаемых моделей связано с определенными трудностями. Поэтому предложена к реализации упрощенная тепловая модель, учитывающая основные характеристики ТД и их условия эксплуатации.

Целью статьи является создание тепловой модели ТД, построенной на основных принципах теории нагревания однородного твердого тела.

Основной раздел. Тепловая энергия, выделяемая ТД, обусловлена различными потерями и вызывает нагревание частей двигателя. Интенсивность нагревания ТД зависит от количества выделяемой тепловой энергии за единицу времени, и характеризуется мощностью теплового потока и теплоемкостью. Мощность теплового потока

пропорциональна мощности двигателя. Интенсивность теплоотдачи обусловлена теплопроводностью самого двигателя и окружающей среды, теплорассеивающими способностями его поверхности, а также скоростью движения тепловоза. За счет теплоемкости ТД и незначительной доли пассивного охлаждения температура обмоток и корпуса ТД может существенно повышаться, что может привести к выходу из строя ТД. Как правило, температура окружающей среды ниже температуры ТД, однако теплоотдача, обусловленная процессами лучеиспускания и конвекции, в полной мере будет эффективна только при наличии принудительного охлаждения, как это реализовано в существующих конструкциях тепловозов.

При разработке математической модели были приняты допущения: тепловая энергия равномерно распределяется по всему объему ТД и рассеяние тепла происходит равномерно по всей поверхности двигателя.

Предположим, что в ТД, имеющем вначале процесса нагрева температуру окружающей среды, за единицу времени выделяется тепловая энергия A калорий, которую назовем тепловым потоком. Часть выделяемого тепла вызывает повышение температуры ТД, а остальная – рассеивается в окружающую среду. Рассеиваемое тепло определяется разностью температур и характеризуется общей теплоотдачей B двигателя. Обозначив теплоемкость двигателя C в кал/°С, как количество тепла, которое поглощается при его нагревании на 1°, а теплоотдачу B в кал/°С, как количество тепла, отдаваемого за единицу времени при разности температур двигателя τ и окружающей среды в 1°, можно представить тепловой процесс за время dt в виде уравнения теплового баланса

$$A dt = C d\tau + B \tau dt.$$

Левая часть представляет собой тепловую энергию, которая выделяется двигателем за бесконечно малый промежуток времени dt . Тепловой поток A кал/сек представляет собой мощность потерь в отдельных частях двигателя ΔP [Вт/сек], B [Вт/°С] и C [Вт·сек/°С] – соответственно теплоотдача и теплоемкость ТД.

Машинная модель строится на базе математической модели теплового баланса. На рис. 1 представлена структура машинной модели.

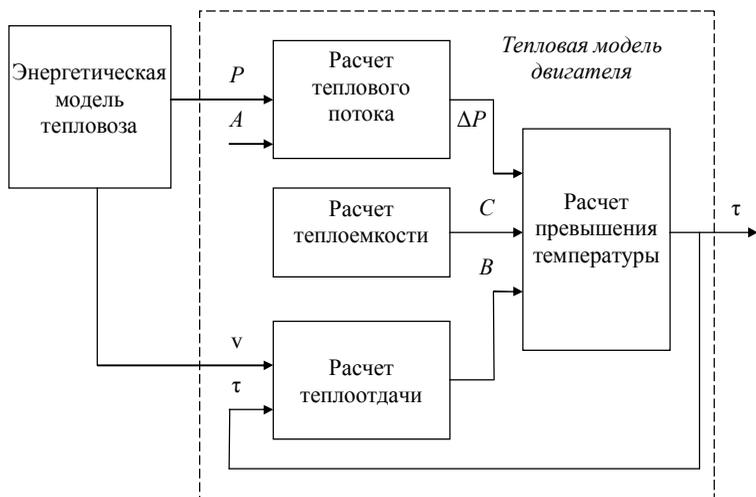


Рис. 1. Структурная схема машинной модели системы охлаждения ТД

Из уравнения теплового баланса тепловой поток Adt определяется потерями в ТД, для расчета которых используется сигнал активной мощности P , значение К.П.Д. двигателя и скорость движения тепловоза (v). В результате рассчитывается значение теплового потока ΔP [Вт].
 Схема модели расчета теплового потока реализована в виде следующей цепи (рис. 2).

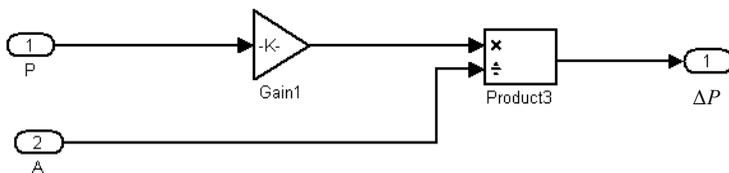


Рис. 2. Схема модели расчета теплового потока ΔP

Для расчета теплоемкости C используется общая масса двигателя и удельная теплоемкость составляющих материалов (медь и сталь) (рис. 3).

На рис. 6 приведены графики превышения температуры двигателя τ , и температуры двигателя τ_0 с учетом температуры окружающей среды $t_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$ при отсутствии обдува двигателя.

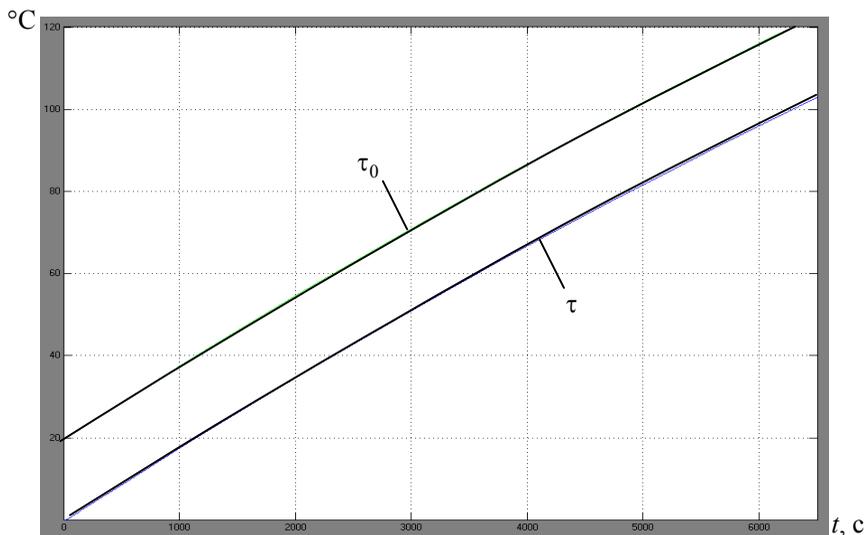


Рис. 6. Графики превышения температуры двигателя τ и температура двигателя τ_0 с учетом температуры окружающей среды без обдува двигателя

Выводы: с учетом проведенного анализа существующих систем охлаждения ТД и особенностей схемы охлаждения тепловоза 2ТЭ116 разработана математическая модель системы тепловоза. В основу разработки тепловой модели ТД тепловоза положена теория нагревания электрических машин, которая, в свою очередь, базируется на основных принципах теории нагревания однородного твердого тела.

На базе математической модели разработана машинная модель, построенная на основе модели теплового баланса. На полученной модели проведены исследования системы ТД тепловоза для различных режимов работы и температур окружающей среды. Даны рекомендации по созданию системы регулируемого охлаждения ТД тепловоза 2ТЭ116.

Список литературы: 1. *Борисенко А.И.* Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах // *А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев.* – Л.: Энергия, 1974. – 560 с. 2. *Алексеев А.Е.* Тяговые электрические машины и преобразователи // *А.Е. Алексеев.* – Л.: Энергия, 1987. – 432 с. 3. *Луков Н.М.* Математическая модель системы охлаждения тяговых электрических машин локомотивов как объекта регулирования температуры / *Н.М. Луков,*

В.М. Попов, А.С. Космодамианский. – М.: РГОТУПС, 1998. – 16 с. Деп. в ВИНТИ 06.11.98, №3217 – В98. **4.** *Космодамианский А.С.* Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов / *А.С. Космодамианский* / Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – М., 2002. – 285 с. **5.** *Некрасов О.А.* Взаимосвязь между условиями работы электроподвижного состава и нагреванием обмоток тяговых двигателей / *О.А. Некрасов* // Труды ВНИИ ж.-д. транспорта. – Вып. 576. – 1977. – С. 4 – 65. **6.** *Щербаков В.В.* Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / *В.В. Щербаков, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин* // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – №7. – С. 156 – 159. **7.** Филонов С.П. Тепловоз 2Т116. Издание второе, переработанное и дополненное / С.П. Филонов и др. – М.: Транспорт, 1985. **8.** Рутштейн А.М. Опытный тепловоз ВЛ85 / А.М. Рутштейн, А.А. Щупак, А.А. Бабин // Электрическая и тепловая тяга. – 1991. – №1. – С. 38 – 40.

УДК 629.42

Тепловая модель тягового двигателя тепловозу / Носков В.І. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 142 – 147.

Розроблена тепла модель тягового двигуна тепловозу 2ТЕ116, яка побудована на основних принципах теорії нагрівання однорідного твердого тіла.

Отримана модель дозволяє проводити дослідження теплового стану тягового двигуна для різних умов експлуатації, та створити систему регульованого охолодження. Іл.: 6. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: тепла модель, тяговий двигун, регульоване охолодження.

UDC 629.42

Thermal model traction engine locomotive / Noskov V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 142 – 147.

Developed a thermal model of the locomotive traction motor 2TE116 based on core principles of the theory of heating a homogeneous solid.

The resulting model allows the study of the thermal state of the traction motor for a variety of operating conditions, and establish a system of regulated cooling. Figs.: 6. Refs.: 8 titles.

Keywords: thermal model, traction motor, controlled cooling.

Поступила в редакцію 12.12.2012

Е.А. ОРОБИНСКАЯ, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков, университет им. Люмьера Лион-2, Франция,

О.И. КОРОЛЬ, аспирант НТУ "ХПИ", Харьков, университет им. Люмьера Лион-2, Франция,

Н.В. ШАРОНОВА, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

ЯЗЫКОВАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В работе обсуждается стратегия автоматизированного построения онтологии на основе анализа патентно-конъюнктурной информации; предлагается подход, основанный на использовании синтаксиса русского языка, позволяющий обнаруживать в специализированных текстах термины данной предметной области. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: автоматизированное построение онтологии, синтаксиса, информационная система.

Постановка проблемы. Предпосылкой появления прорывных технологий в области автоматической обработки текстов авторы считают поиск решений на основе методов системного анализа, как самого объекта исследования (текста), так и поставленных прикладных задач, которые должны быть решены в результате такой обработки. Иными словами, для семантического анализа текстовой информации требуется онтологический подход, и это, в свою очередь, означает, что для того чтобы обнаружить в тексте требуемую информацию, информационная система (ИС) сама должна обладать достаточным объемом лингвистических знаний.

Спектр же "интеллектуальных" задач, решение которых можно "поручить" таким ИС, чрезвычайно широк: от машинного перевода до формирования полноценных баз знаний, трактуемых сегодня как онтологии предметных областей. Непосредственно перед авторами стоит задача разработать систему обработки патентно-конъюнктурной информации (ПКИ) на основе анализа патентной документации, как правило, представляющей собой малоструктурированные тексты.

Анализ литературы свидетельствует о том, что в настоящее время активно ведется разработка программных средств, позволяющих автоматизировать процессы обработки информации [1, 2]. В [3] предложена классификация существующих программных средств по их назначению, а в [1, 2, 4, 5] представлен систематизированный анализ методов, позволяющих обнаруживать и извлекать из текста конструктивные элементы для построения ИС или расширения уже существующей. Работы [6, 7, 8] доказывают, что именно использование

лингвистических методов позволяет существенно улучшить качество автоматического анализа текста.

Цель работы – разработка лингвистического обеспечения для создания интеллектуальной системы автоматизированного построения онтологии на основе анализа и обработки текстовой патентно-конъюнктурной информации.

Текст как динамическая система. В общепринятом смысле под системой понимается множество взаимосвязанных элементов, обособленное от среды и взаимодействующее с ней, как целое. Несложно видеть, что патентная конъюнктурная информация, как и любая другая прикладная область, действительно представляет собой специальное множество с эмерджентными свойствами, обладающее структурной, функциональной и динамической организацией [9, 10].

Структурная организованность текста наблюдается со всей очевидностью: слова, предложения, абзацы, разделы и т.д. Число конструктивных элементов текста конечно и называется *словарем*. Слова формируют *переменные комбинации* по синтаксическим *правилам*, число которых также ограничено. С другой стороны, огромное множество конкретных способов и аспектов описания любой конкретной ситуации, кажется, могло бы существенно затруднить возможности естественнонаучного моделирования текста.

В рамках любой прикладной естественнонаучной дисциплины математическое моделирование оказывается эффективным благодаря выбору *ограниченного (конечного) числа степеней свободы* изучаемого явления, т.к. большинство степеней свободы динамической системы, на самом деле, являются связанными. В языке наблюдается та же всеобщая взаимосвязь слов, которая отражает иерархичность объектов действительности, обозначаемых этими словами – лексико-семантическими группами, связанными таксономическими отношениями. Для обозначения любого предмета можно последовательно указать все более общие понятия. Таким образом, мы неизбежно приходим к самому общему понятию "вещь" (объект, субстанция), являющемуся уже категорией познания, а не языка.

Патентная документация систематизируется от более общих к более узким тематическим и проблемным рубрикам в соответствии с международной классификацией изобретений (МКИ), что облегчает поиск требуемой информации. Проиллюстрировать сказанное можно на примере классификации, выполненной на основе патента на письменный компьютерный стол (<http://base.uiprv.org>). Формула (1) демонстрирует таксономические отношения системы классификации описываемого

объекта [3, 4]. Здесь символом X обозначены предметные переменные, которые представляют конкретные концепты онтологии ПКИ:

$$\begin{cases} X_{1112147221}^{21/00} = X_{11121472}^B \wedge X_{1112147}^{47} \wedge X_{11121}^A \wedge X_{1112}^Y \wedge X_{111}^H \wedge X_{11}^{ИПМ} \wedge X_1^{PC} \wedge X_0^{IC}, \\ X_{1112147221}^{21/00} \wedge \overline{X_{1112147221}^{21/00}} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $X_{1112147221}^{21/00}$ – компьютерный стол; $X_{11121472}^B$ – мебель; $X_{1112147}^{47}$ – артефакт; X_{11121}^A – жизненные потребности человека; X_{1112}^Y – устройство; X_{111}^H – новое устройство; $X_{11}^{ИПМ}$ – изобретение; X_1^{PC} – промышленная собственность; X_0^{IC} – интеллектуальная собственность.

То же касается описания свойств объектов и отношений между ними. Это значит, что и при вербальном описании ситуации наблюдается та же фактическая возможность существенно ограничить множество ее составляющих и свести все способы описания ситуации к упрощенной универсальной модели. Более того, очевидно, что ВСЕ возможные составляющие, не только не могут быть использованы в описании ситуации, но и не нужны, т.к. лишь затрудняют ее восприятие. Поэтому для распознавания некоторой ситуации достаточно отобрать лишь те составляющие, которые являются значимыми с точки зрения эксперта-разработчика модели.

Таким образом, мы видим, что текст соответствует понятию системы и может быть интерпретирован как структурно-функциональная, знаковая модель внешней ситуации.

Семантический анализ на основе синтаксем. Далее следует выявить, что именно нужно рассматривать в качестве элементарных структурных единиц текста, которые должны служить основой эффективного семантического анализа, определить их функциональные возможности и роли.

Согласно работам Г.А. Золотовой [13], синтаксический строй речи (текста) организуется регулярными комбинациями "элементарных" единиц, далее неделимых на синтаксическом уровне, из которых строятся все другие более сложные (речевые или текстовые) конструкции. В качестве такой единицы выдвинуто понятие синтаксемы. Синтаксемой, по Золотовой Г.А., называется минимальная далее неделимая семантико-синтаксическая единица языка, выступающая одновременно и как носитель элементарного смысла, и как конструктивный компонент с функциональностью, необходимой и

достаточной для построения более сложных синтаксических конструкций.

Признаками синтаксемы служат: 1) категориальное значение слова, от которого она образована; 2) конкретная морфологическая форма; 3) функциональность, вытекающая из двух первых признаков, как способность реализовываться в определенных позициях (речи, теста), как возможная роль в построении коммуникативной единицы.

Золотова Г.А. различает три функциональных роли: 1) возможность самостоятельного независимого существования синтаксемы; 2) использование синтаксемы в качестве компонента предложения; 3) использование синтаксемы в качестве компонента словосочетания, так называемое присловное употребление.

Функциональные свойства синтаксем служат основой для разграничения трех возможных типов, называемых, соответственно, *свободными* – А (или обладающими полным функциональным репертуаром), *обусловленными* – Б (способными выполнять функции 2, 3, крайне изредка – 1), *связанными* – В (выступающими только в роли 3). Очевидно, что функциональные свойства синтаксем имеют транзитивный характер.

Рассматривая текст как динамическую систему, мы имеем возможность рассматривать процесс построения онтологии как целенаправленную операционную деятельность в своих пределах (т.е. в пределах данной системы), организованную для решения задач содержательного наполнения элементов онтологии. Само же понятие онтологии в терминах онтологического инжиниринга определено следующим образом [6]:

$$O = (C, \leq_c, R, \sigma_R, \leq_R, A, \sigma_A, T), \quad (2)$$

где C, R, A, T – являются несвязанными множествами, чьи элементы называются идентификаторами концептов, отношений, атрибутов и типов данных соответственно; \leq_c – полусвязанная таксономия концептов с общим элементом самого верхнего уровня $root_c$; функция $\sigma_R: R \rightarrow C^+$, называемая признаком отношения (*relation signature*); \leq_R on R , иерархия отношений где, $r_1 \leq_R r_2$ подразумевает $|\sigma_R(r_1)| = |\sigma_R(r_2)|$ и $\pi_i(\sigma_R(r_1)) \leq \pi_i \sigma_R(r_2)$ для каждого $i \leq |\sigma_R(r_1)|$; функция $\sigma_A: A \rightarrow C \times T$, называемая *признаком атрибута (attribute signature)*; множество *типов данных* T , таких как строки, целые числа и т.д.

В первом приближении можно согласиться с порядком, предложенным Симиано и др. [6] для построения онтологии на основе текста, известным как *layer cake technology*:

– сначала определяются термины-кандидаты, слова характеризующиеся, как специфичные в нашей области ПКИ;

– затем найденные термины объединяются в семантически близкие группы (кластеры) на основании сравнения их атрибутов. Сформированным кластерам присваивается общая метка, называемая концептом;

– найденные концепты упорядочиваются в таксономические структуры;

– определяются ассоциативные связи между концептами;

– оформляются правила построения новых концептов.

Задача обнаружения терминов-кандидатов довольно успешно решается сегодня многочисленными статистическими методами [8]. Задачи их группировки также отчасти разрешимы этими методами (на основе анализа частот совместного появления слов на некотором ограниченном расстоянии). Но проблема обнаружения связей между понятиями не может быть удовлетворительно решена без привлечения лингвистических знаний.

Для обеспечения языковой компетентности, достаточной для самообучения и решения конечной задачи, т.е. построения патентной онтологии на базе текста, ИС сама должна обладать знаниями соответствующего порядка – общими (языковыми) и специальными (относящимися к конкретной предметной области). Такая ИС должна, по сути, объединять в себе две онтологии: общую онтологию языка (русского) и базовую (стартовую) онтологию ПКИ.

Проиллюстрируем сказанное.

Так, поссессив (т.е. отношения принадлежности, владения) в русском языке может быть выражен следующими грамматическими формами: И.п., Р.п., у + Р.п., Т.п. (*именительный падеж, родительный падеж, предлог «у» плюс родительный падеж, творительный падеж*). Очевидно, что функции каждого падежа в русском языке разнообразны. Возможность «выхода» именно на отношения принадлежности обеспечивается указанием на категории слов, в сочетании с которыми данные падежи выражают отношения принадлежности. Так, например, глаголы {*обладать, обзаводиться, владеть*} в сочетании с творительным падежом существительного определяют именно эти отношения.

Надо признать, что создание ИС, обладающих таким анализатором, требуют больших усилий и затрат. Именно поэтому до последнего времени большинство инженерных решений для задач текстового анализа ограничивались статистическими методами, также приносящими положительные результаты. Но статистические методы, какими бы тонченными они не были, имеют заведомый предел своей точности и не

могут быть причисленными к интеллектуальным, оперирующим со смыслом текста.

Например, пусть имеется следующий набор потенциальных терминов-элементов для онтологии, содержащей ПККИ: "компания, мебель, представлять, жесткая конструкция, стол". Без дополнительной синтаксической информации невозможно определить точное содержание ситуации, а значит, и функцию каждого элемента: идет ли речь о возможном *представлении (описании)* стола как разновидности мебели) или о *действиях* какой-то компании, которая *представляет*, т.е. *предлагает* мебель в виде стола). Порядок слов в русском языке далеко не всегда может служить признаком выполняемой функции.

Все становится на свои места, если с перечнем слов мы получим дополнительную синтаксическую информацию об актантах глагола "представлять", например, о падеже актанта "стол":

– либо это (представлять + Т.п.), и тогда это указание на вероятное состояние: мебель представлена столом жесткой конструкции (субъект высказывания имеет модальную модификацию);

– либо это (представлять + И.п.), и тогда это указание на вероятное действие (так называемый потенсив), т.е. стол представляет мебель жесткой конструкции.

Поэтому тенденция современных исследований направлена именно на внедрение в ИС лексических знаний.

Заключение. Анализ текстовой патентно-конъюнктурной информации и извлечение из полнотекстовых документов релевантных данных остается актуальной задачей инженерии знаний в целом, и онтологического инжиниринга в частности. Качественное расширение возможностей ИС возможно при условии внедрения в них модулей, способных извлекать характеристики концептов на основе лингвистического анализа. Одним из возможных способов решения этой задачи является использование лингвистических шаблонов. Авторы предлагают общий подход на основе рассмотрения синтаксиса русского языка. Поскольку каждая синтаксема описывается конечным детерминированным множеством признаков, такой подход является не только возможным, но и предпочтительным, поскольку он обеспечивает однозначное определение свойств концептов создаваемой онтологии. Трудоемкость задачи окупается качеством получаемых результатов. В следующей статье авторы планируют привести пример, иллюстрирующий работу лингвистического модуля разрабатываемой ИС для ПККИ и описать предлагаемый Фреймворк ИС.

Список литературы: 1. AI3's Inaugural State of Tooling for Semantic Technologies / Adaptive Information Adaptive Innovation Adaptive Infrastructure // URL

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

<http://www.mkbergman.com/991/the-state-of-tooling-for-semantic-technologies>. **2.** *Ермаков А.Е.* Автоматизация онтологического инжиниринга в системах извлечения знаний из текста / *А.Е. Ермаков* // Труды Международной конференции Диалог'2008. – Москва, Наука, 2008. – С. 136-140. **3.** *Corcho O.* Methodologies, tools, and languages for building ontologies. Where is their meeting point? / *O. Corcho, M. Fernandez-Lopez, A. Gomez-Perez* // *Data & Knowledge Engineering*. – 2003. – 46. – P. 41-64. **4.** *Buitelaar P.* Ontology Learning from Texts: An Overview / *P. Buitelaar, P. Cimiano, B. Magnini* // In *Ontology Learning from Text: Methods, Evaluation and Applications*, 2005. – Vol. 123. – P. 234-265. **5.** *Simperl E.* Achieving Maturity: the State of Practice in Ontology Engineering / *E. Simperl, M. Mocho* // In *International Journal of Computer Science and Applications, Technomathematics Research Foundation*. – 2010. – Vol. 7. – № 1. – P. 45-65. **6.** *Makki J.* Semi Automatic Ontology Instantiation in the domain of Risk Management / *J. Makki, A.-M. Alquier, V. Prince* // In *IFIP, Advances in Information and Communication Technology*. – 2008. – Vol. 288. – P. 254. **7.** *Buileaar P.* Topic extraction from scientific literature for competency management / *P. Buileaar, T. Eigner* // In *The 7th International Semantic Web Conference PICKME 2008, 27 octobre Karlsruhe, Germany*. – P. 55-67. **8.** *Zhou L.* Ontology Learning: State of the Art and Open Issues / *L. Zhou* // *Information Technology and Management*. – 2007. – 8 (3). – P. 241-252. **9.** *Бондаренко М.Ф.* Теория интеллекта / *М.Ф. Бондаренко, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко*. – Харьков: Компания СМІТ, 2006. – 576 с. **10.** *Шаронова Н.В.* Автоматизированные информационные библиотечные системы: задачи обработки информации: монография, НУА / *Н.В. Шаронова, Н.Ф. Хайрова*. – Х.: 2003. – 120 с. **11.** *Король О.И.* Интеллектуальная обработка данных при формировании патентно-конъюнктурных баз знаний: Научно-технический журнал "Біоніка інтелекту" / *О.И. Король, Н.В. Шаронова*. – Х.: Компания СМІТ. – 2012. – № 1 (78). – С. 12-16. **12.** *Король О.И.* Представлення й класифікація неструктурованих патентно-кон'юнктурних даних / *О.И. Король* // "Системи обробки інформації". – Харків. – 2011. – № 8 – С. 54-58. **13.** *Золотова Г.А.* Синтаксический словарь: Репертуар элементарных единиц русского синтаксиса // *Г.А. Золотова*. – Едиториал УРСС, 2011. – 439 с.

УДК 004.41:47; 347.77

Мовна компетенція інформаційних систем / Оробінська О.О., Король О.І., Шаронова Н.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 148 – 154.

В роботі обговорюється стратегія автоматизованої побудови онтології на основі аналізу текстової патентно-кон'юнктурної інформації; запропоновано підхід, оснований на використанні синтаксем російської мови, що дозволяє знаходити у спеціалізованих текстах терміни даної предметної області. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: автоматизована побудова онтології, синтаксема, інформаційна система.

UDC 651.326

Technologi of reconfigurable computing / Orobinska O.O., Korol O.I., Sharonova N.V. // *Herald of the National Technical University "KhPI"*. Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 148 – 154

In this paper the strategy of automated ontology building is discussed for patent-conjuncture research. The method based on the utilization of Russian syntaxemes is proposed. This method allows finding the terms of domain in the specialized texts. Refs.: 13 titles.

Keywords: automated ontology construction, syntaxem, informational system.

Поступила в редакцію 27.07.2012

С.В. ПАВЛЕНКО, м.н.с., ОНПУ, Одесса,
В.Д. ПАВЛЕНКО, канд. техн. наук, с.н.с., доц., ОНПУ, Одесса,
С.А. ПОЛОЖАЕНКО, д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Одесса

МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВОЛЬТЕРРА С ПОМОЩЬЮ ТЕСТОВЫХ ПОЛИИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Рассматриваются методы детерминированной идентификации нелинейных динамических систем на основе моделей Вольтерра во временной области. В качестве тестовых воздействий используются нерегулярные последовательности импульсов. Проводится сравнительный анализ эффективности методов идентификации по точности, помехоустойчивости и вычислительной сложности. Для повышения вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации применяются процедуры шумоподавления, основанные на вейвлет-преобразованиях. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: идентификация, нелинейные системы, модели Вольтерра, вейвлет-преобразования.

Постановка проблемы и анализ литературы. Для математического и компьютерного моделирования сложных нелинейных динамических систем (НДС) широко используются интегростепенные ряды Вольтерра (РВ) [1]. При этом нелинейные и динамические свойства системы полностью характеризуются последовательностью многомерных весовых функций — ядер Вольтерра (ЯВ), и задача идентификации НДС – построения модели в виде РВ – заключается в определении ЯВ на основе данных экспериментальных исследований системы "вход–выход" [2].

Известны методы детерминированной идентификации НДС с использованием тестовых нерегулярных импульсных последовательностей: компенсационный [3], аппроксимационный [4] и интерполяционный [5]. Преимущества детерминированных методов по сравнению с методами статистической идентификации [2] – сравнительная простота обработки экспериментальных данных и реализации тестовых сигналов. Однако, на результаты детерминированной идентификации существенное влияние оказывают погрешности измерений. Получаемые решения – оценки ЯВ – оказываются неустойчивыми к погрешностям измерений откликов идентифицируемой НДС [6], что ограничивает применение методов в условиях реального эксперимента.

Цель статьи исследование погрешностей, возникающих при использовании методов детерминированной идентификации [3 – 5],

повышение вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации с помощью применения вейвлет-фильтрации, сравнительный анализ эффективности методов по точности, помехоустойчивости и вычислительной сложности.

Методы идентификации многомерных ядер Вольтерра с помощью нерегулярных последовательностей импульсов.

Компенсационный метод идентификации НДС в виде ЯВ во временной области основан на испытании исследуемой системы нерегулярными последовательностями импульсов с варьируемыми параметрами: амплитудой A и длительностью Δt тестовых импульсов и интервалами между импульсами [3].

Модель тестового сигнала в виде нерегулярной последовательности, содержащая не более n импульсов прямоугольной формы, действующих в моменты времени τ_i

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \delta_{\tau_i} S \delta(t - \tau_i), \quad \tau_i \in [0, t], \quad (1)$$

где $S = A \Delta t$ – площадь импульса в тестовой последовательности; $\delta(t - \tau_i)$ – дельта-функция Дирака; t – текущее время; δ_{τ_i} – параметр, определяющий количество импульсов последовательности и интервалы между ними; если $\delta_{\tau_i} = 1$, то в момент времени τ_i в последовательности импульс есть; при $\delta_{\tau_i} = 0$ – отсутствует.

С помощью формализма [3] получены соотношения, задающие вычислительный алгоритм экспериментального определения диагонального и поддиагональных сечений ЯВ n -го порядка НДС с одним входом и одним выходом

$$\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{(-1)^n}{n! S^n} \sum_{\delta_1, \dots, \delta_n=0}^1 (-1)^{\sum_{i=1}^n \delta_i} y(t, \delta_1, \dots, \delta_n), \quad (2)$$

где $\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n)$ – оценка сечения ЯВ n -го порядка; $y(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$ – отклик НДС, измеренный в момент времени t , при действии на входе модулированных дельта-импульсов площади S соответственно в моменты времени τ_1, \dots, τ_n .

Выражение (2) получено при условии, что длительность Δt и амплитуда A тестовых импульсов достаточно малы [3]. В результате обработки откликов НДС $y(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$ (2) находятся приближенные значения сечений ЯВ, точность определения которых зависит от выбора площади S тестового импульса, т.е. от значений A и Δt .

При уменьшении амплитуды тестовых импульсов уменьшается методическая погрешность идентификации, но возрастает относительная погрешность измерений [3]. Следовательно, существует оптимальное значение амплитуды A , при которой достигается минимальная погрешность экспериментального определения ЯВ, что позволяет поставить задачу регуляризации процедуры идентификации, используя в качестве параметра регуляризации амплитуду A тестовых импульсов.

Аппроксимационный метод идентификации НДС во временной области основан на выделении в отклике НДС n -ой парциальной составляющей (ПС) $y_n[x(t)]$, соответствующей n -му члену РВ, с помощью построения линейных комбинаций откликов на тестовые сигналы с разными амплитудами [4].

Если на вход системы поочередно подаются тестовые сигналы $a_1x(t), a_2x(t), \dots, a_Nx(t)$, где N – порядок аппроксимационной модели; a_1, a_2, \dots, a_N – различные вещественные числа, удовлетворяющие условию $0 < |a_j| \leq 1$ для $\forall j = 1, 2, \dots, N$; $x(t)$ – произвольная функция, то линейная комбинация откликов НДС на эти воздействия равна n -ой ПС отклика на сигнал $x(t)$ с погрешностью Δ , т.е.

$$\sum_{j=1}^N c_j y[a_j x(t)] = y_n[x(t)] + \Delta, \quad (3)$$

где c_j – действительные коэффициенты, такие что удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^N c_j \cdot a_j^k = \delta_k^n = \begin{cases} 1, & k = n; \\ 0, & k \neq n, \end{cases} \quad k = \overline{1, N}; \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (4)$$

$$\Delta = \sum_{j=1}^N c_j \sum_{k=N+1}^{\infty} y_k [a_j x(t)]. \quad (5)$$

При использовании сигналов $x(t)$, представляющих собой нерегулярные импульсные последовательности (1), оценка поддиагонального сечения ЯВ n -го порядка НДС

$$\hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{(-1)^n}{n! (\Delta \tau)^n} \sum_{\delta_1, \dots, \delta_n=0}^1 (-1)^{i=1} \sum_{i=1}^n \delta_i \hat{y}_n(t, \delta_1, \dots, \delta_n), \quad (6)$$

где $\hat{y}_n(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$ – оценка n -ой ПС отклика НДС в момент времени t , полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3).

Оценка диагонального сечения ЯВ n -го порядка

$$\hat{w}_n(t, t, \dots, t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{(\Delta\tau)^n}, \quad (7)$$

где $\hat{y}_n(t)$ – оценка n -ой ПС отклика НДС на одиночный импульс в момент времени t , полученная в результате обработки данных экспериментов на основе (3).

Для минимизации погрешности выделения ПС отклика НДС (5), обусловленной членами РВ порядка выше N -го, необходимо обеспечить минимум суммы модулей коэффициентов c_j ($j = 1, 2, \dots, N$), которые определяются из системы уравнений (4)

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^N |c_j| = \sum_{j=1}^N \left| \sum_{k=1}^N a_{jk}^{-1} \delta_k^n \right| = \sum_{j=1}^N |a_{jn}^{-1}| = \frac{1}{|\det \mathbf{A}|} \sum_{j=1}^N |M_{jn}| = \min, \quad (8)$$

где a_{jk}^{-1} – элемент матрицы, обратной матрице

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_N \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_N^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^N & a_2^N & \dots & a_N^N \end{bmatrix},$$

$\det \mathbf{A}$, M_{jn} – определитель и миноры матрицы \mathbf{A} , соответственно.

В соответствии с (8) задача обеспечения минимума методической ошибки при применении аппроксимационного метода идентификации сводится к нахождению локальных минимумов функции многих переменных, т.е. суммы модулей коэффициентов c_j . С помощью процедуры полного перебора различных значений амплитуд, решением каждый раз для них системы линейных алгебраических уравнений (4), вычисляются соответствующие им коэффициенты. Находя минимальное значение выражения (8), определяют оптимальные значения амплитуд a_1, a_2, \dots, a_N для заданных параметров n и N метода идентификации.

В *интерполяционном* методе идентификации НДС на основе РВ для разделения отклика НДС на ПС $\hat{y}_n(t)$ используется n -кратное дифференцирование выходного сигнала по параметру–амплитуде a тестовых воздействий [5].

Если на вход системы подать тестовый сигнал вида $ax(t)$, где $x(t)$ – произвольная функция; $|a| \leq 1$ – масштабный коэффициент, то для выделения ПС n -го порядка $\hat{y}_n(t)$ из измеряемого отклика НДС $y[ax(t)]$ необходимо найти n -ую частную производную отклика по амплитуде a при $a = 0$

$$\hat{y}_n(t) = \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{r=1}^n x(t - \tau_r) d\tau_r = \frac{1}{n!} \left. \frac{\partial^n y[ax(t)]}{\partial a^n} \right|_{a=0}. \quad (9)$$

С помощью тестовых нерегулярных последовательностей импульсов длительностью Δt и процедуры (9) вычисляются ПС откликов $\hat{y}_n(t)$ и $\hat{y}_n(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$, на основе которых и выражений (7) и (6) определяются диагональное и поддиагональные сечения ЯВ.

Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации.

Для повышения вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации к получаемым оценкам многомерных ЯВ применяются процедуры шумоподавления (сглаживания), основанные на вейвлет-преобразовании [7].

Шумоподавление достигается удалением высокочастотных составляющих из спектра сигнала, представляющего аддитивную смесь информационной составляющей, получаемой в результате обработки откликов сечения ЯВ и шума, обусловленного погрешностью измерительной аппаратуры. Применительно к вейвлетным разложениям это может быть реализовано непосредственно удалением детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней. Задавая некоторый порог для их уровня, и срезая по нему детализирующие коэффициенты, можно добиться уменьшения уровня шумов [8].

Для тестового объекта минимальная среднеквадратичная ошибка (СКО) идентификации достигается при использовании материнского вейвлета `coiflet – coif4` с уровнем глубины разложения $L = 4$. При этом получаются сглаженные решения, а погрешность идентификации уменьшается в 1,5 – 2 раза.

В таблице приведены значения процентной нормированной СКО (ПНСКО) [4] ε_n оценки диагональных сечений ЯВ второго порядка $\hat{w}_2(t, t)$ для тестового объекта, полученные с помощью методов детерминированной идентификации (компенсационного, аппроксимационного и интерполяционного) при тестовых импульсных воздействиях с оптимальными амплитудами при погрешности измерений откликов $\sigma = 1, 3, 5 \%$ без применения и с применением вейвлет-фильтрации. В таблице приведены также количество тестовых экспериментов (K) и количество используемых операций сложения и вычитания (P), характеризующих вычислительную сложность алгоритмов идентификации.

Таблица

ПНСКО оценки диагональных сечений ЯВ 2-го порядка для тестового объекта, полученные с помощью методов детерминированной идентификации при тестовых импульсных воздействиях с оптимальными амплитудами

Параметры методов	K	P	Минимальные ПНСКО ε_n (%) при погрешности измерений σ (%)					
			Без применения вейвлет-фильтрации			С применением вейвлет-фильтрации		
			$\sigma=1$	$\sigma=3$	$\sigma=5$	$\sigma=1$	$\sigma=3$	$\sigma=5$
	Компенсационный метод [3]							
	2	4	44,0	66,5	77,1	30,1	43,7	53,7
N	Аппроксимационный метод [4]							
2	2	4	12,6	25,9	37,0	10,8	15,0	18,3
3	3	6	11,9	24,5	33,5	9,08	13,3	16,9
4	4	8	15,7	40,3	63,3	11,2	18,1	24,5
5	5	10	15,2	38,0	58,7	11,1	17,0	22,7
6	6	12	18,7	50,4	80,5	11,9	20,5	29,3
$r_1=r_2$	Интерполяционный метод [5]							
1	2	5	13,0	26,3	37,5	10,9	15,5	19,2
2	4	9	14,7	36,5	58,1	11,2	16,8	23,6
3	6	11	19,6	54,1	88,1	11,6	20,8	31,5
4	8	12	25,6	77,3	126,0	13,1	25,1	44,0

Выводы. Сравнение результатов идентификации НДС тремя методами детерминированной идентификации с помощью нерегулярных последовательностей тестовых импульсов на тестовом объекте показывает, что наименее точный из них – компенсационный. Аппроксимационный метод, основанный на составлении линейных комбинаций откликов системы на тестовые последовательности импульсов с разными амплитудами (3), (6) и (7), имеет высокие показатели эффективности, но уступает по точности интерполяционному. Наиболее высокой точностью и помехоустойчивостью обладает интерполяционный метод идентификации, заключающийся в дифференцировании откликов по параметру–амплитуде тестовых импульсов (9).

Список литературы: 1. *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. 2. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления: учеб. для вузов. В 5 т. Т. 2. / Под ред *К.А. Пупкова* и

Н.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 638 с. 3. Павленко В.Д. Компенсационный метод идентификации нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры / В.Д. Павленко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2009. – Вып. 2 (32). – С.121-129. 4. Данилов Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Е.С. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с. 5. 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. 6. Апарцин А.С. О повышении точности моделирования нелинейных динамических систем полиномами Вольтерры / А.С. Апарцин // Электронное моделирование. – 2001. – № 6. – С. 3-12. 7. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с. 8. Павленко С.В. Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерры / С.В. Павленко // Вост.-европ. журн. передовых технологий. – Харьков. – 2010. – № 6/4 (48). – С. 65-70.

УДК 681.5.015.52

Методи ідентифікації нелінійних систем на основі моделей Вольтерра за допомогою тестових поліімпульсних впливів / Павленко С.В., Павленко В.Д., Положаєнко С.А. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968) – С. 155 – 161.

Розглядаються методи детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра в часовій області. Тестовими впливами використовуються нерегулярні послідовності імпульсів. Проводиться порівняльний аналіз ефективності методів ідентифікації щодо точності, завадостійкості та обчислювальної складності. Для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів ідентифікації застосовуються процедури шумозаглушення, які засновані на вейвлет-перетвореннях. Табл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: ідентифікація, нелінійні системи, моделі Вольтерра, вейвлет-перетворення.

UDC 681.5.015.52

Identification methods nonlinear systems on base Volterra models using testing by poly pulses / Pavlenko S.V., Pavlenko V.D., Polozhaenko S.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 155 – 161.

Methods of deterministic identification of nonlinear dynamic systems on the basis of Volterra models in time domain are considered. Irregular pulse sequences are used test influence as test impacts. Inaccuracies, appearing when using the methods of deterministic identification are studied: benchmark analysis of their efficiency by accuracy and noise-immunity is carried out. For increasing computational stability of identification algorithms, the procedures of noise suppression based on wavelet-transforms, are used. Tabl.: 1. Refs.: 8 titles.

Keywords: identification, nonlinear systems, Volterra models, wavelet-transforms

Поступила в редакцію 15.08.2012

Н.І. ПОВОРОЗНЮК, канд. техн. наук, доц., НТУУ "КПІ", Київ,
К.Е. БОБРІВНИК, асист., НУХТ, Київ

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ (SMART GRID)

Розглянуті тенденції розвитку енергетичних систем. Проаналізований сучасний етап розвитку систем енергозабезпечення і вказані проблеми і виклики. Обґрунтована необхідність підвищення якості вимірювання параметрів енергосистем. Запропонований алгоритм синхронізованих вимірювань векторів напруги і струму на основі вейвлет-перетворення і проаналізовані похибки вимірювань. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: інтелектуальні системи електроживлення, вейвлет-перетворення, синхронні вимірювання векторів напруги і струму.

Постановка проблеми. Бурхливий розвиток світової економіки призводить до того, що традиційні системи електроживлення вже не відповідають вимогам і викликам сучасності. Виснаження джерел органічних енергоносіїв і забруднення довкілля від їх спалювання стимулює розробку і впровадження відновлювальних джерел енергії, розподілених по великій території. Різко зростає частка споживачів чутливих до якості електроенергії. Це лише частина проблем, яка постала перед сучасною енергетикою.

Для вирішення цих проблем у США і Європейському Союзі була розроблена концепція розвитку енергетики, яка дістала назву Smart Grid [1, 2], що можна трактувати як інтелектуальні енергетичні системи. Цією концепцією передбачається підняти енергетику на якісно вищий рівень, зокрема за рахунок масового впровадження мікропроцесорної техніки з відповідним програмним забезпеченням, істотно підвищити її надійність, ефективність, керованість, захищеність. У 2006 році в Україні була прийнята "Енергетична стратегія України на період до 2030 року", якою передбачено розвиток вітчизняної енергетики відповідно до нових вимог і викликів.

Аналіз літератури. Концепція Smart Grid була розроблена у США і Європейському Союзі на урядовому рівні [1 – 3]. У [4] аналізуються перспективи розвитку енергетики на майбутнє. Розвиток енергетики в Україні аналізується в [5]. Однією з найважливіших складових енергетики завтрашнього дня є розвиток новітньої системи вимірювань. Проблеми у цій галузі аналізуються в [6 – 9]. Глобальна система позиціонування GPS дала змогу здійснювати синхронні вимірювання векторів напруги і струму електромережі у будь-яких точках земної поверхні. Уперше синхронні вимірювання векторів напруги і струму

запропонував у 1983 році і здійснив на практиці у 1988 році професор Політехнічного інституту у штаті Вірджинія (США) Еран Фадке (Arun Phadke) [10]. Авторитетна міжнародна організація IEEE розробила для приладів, що виконують такі вимірювання стандарт [11]. В Україні, в Інституті електродинаміки НАНУ була розроблена і впроваджена у практику система синхронних вимірювань "Регіна-Ч" [12], яка не поступається зарубіжним аналогам. Проблеми синхронних вимірювань векторів напруги і струму висвітлено у джерелах [13 – 15].

Мета статті. Розв'язати проблему підвищення якості електроенергії.

Вступ. На сучасному етапі розвитку системи електроживлення є однією з найважливіших складових цивілізаційного розвитку людства. Традиційні системи електроживлення, у яких значна частина енергії генерується потужними електростанціями, що працюють на органічних енергоносіях (кам'яне вугілля, нафта, природний газ тощо), і передається до кінцевого споживача через магістральну і розподільчу мережу, вже не відповідає сьгоднішнім вимогам і викликам. У зв'язку з цим була розроблена нова концепція інноваційного перетворення енергетики Smart Grid, яка включає такі основні положення: модернізація галузі на всіх її рівнях, включаючи генерацію, передачу, розподіл і споживання електроенергії; розвиток "інтернет-подібної" інфраструктури для підтримки не тільки енергетичних, а й інформаційних, економічних, фінансових та інших взаємозв'язків між усіма суб'єктами енергоринку; розробка і впровадження нових технологій, які дають змогу істотно поліпшити існуючі і створити нові функціональні можливості енергосистем; концепція охоплює весь комплекс робіт від пошукових досліджень до впровадження інновацій у практику і провадиться на науковому, технічному, технологічному, інформаційному, правовому рівнях.

Вимірювання енергетичних параметрів. Одним з пріоритетних напрямків технологічного розвитку у руслі концепції Smart Grid є розробка і впровадження інтелектуальної системи вимірювання (AMI — Advanced Metering Infrastructure). Однією з важливих складових таких систем є застосування інтелектуальних датчиків, які крім функції вимірювання виконують статистичну обробку результатів вимірювання, вибирають в автоматичному режимі діапазон вимірювання та інші параметри вимірювального пристрою, підтримують інтерфейсні функції. Інтелектуальні датчики зв'язані між собою комунікаційною мережею. Це дає змогу не тільки передавати вимірювальну інформацію (наприклад, про спожиту електроенергію) від споживача до диспетчера, а й у

зворотному напрямі (наприклад, інформувати споживача про тарифи на електроенергію у даний момент часу).

Вимірювання векторів струму і напруги за допомогою вейвлет-перетворення. Серед енергетичних параметрів, які вимірюються за допомогою інтелектуальної системи вимірювання, важливе значення має вимірювання векторів напруги і струму у найважливіших точках електричної мережі. Відомо, що синусоїдну напругу (струм) електричної мережі

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1)$$

можна представити вектором (англ. *Phasor*), що має довжину (модуль) $U = U_m / \sqrt{2}$, рівний діючому значенню, і кут ψ_u , рівний початковій фазі. Вектори напруги і струму використовувалися дотепер лише для теоретичного аналізу електричних кіл, а на практиці обмежувалися вимірюванням діючих значень.

Ситуація змінилася із розробкою і введенням в експлуатацію глобальної системи позиціонування GPS (*Global Position System*), яка складається з 24 штучних супутників, розміщених на 6 геостаціонарних орбітах. Система генерує з високою точністю синхроімпульси з інтервалом 1 мікросекунда, які прив'язані до Всесвітнього координованого часу UTS (англ. *Coordinated Universal Time*). Синхроімпульси можна сприймати по радіоканалу у будь-якій точці земної поверхні. За допомогою таких синхроімпульсів можна виміряти початкові фази струмів і напруг, тобто кути векторів струму і напруги у всіх найважливіших точках електромережі у єдиній системі координат. Виміряні фазові співвідношення між напругами і струмами електромережі дають цінну інформацію про її стан. Крім того, синхронізовані вимірювання векторів напруги (струму) (англ. *Synchrophasor*) згідно з концепцією Smart Grid використовуються для виявлення несправностей в електромережі, її діагностуванні, релейному захисті, для керування об'єктами електромережі на всіх рівнях ієрархії.

Синхронізовані вимірювання векторів напруги і струму у різних точках електромережі здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв PMU (англ. *Phasor Measurement Unit*). PMU складається з таких частин: вхідний антиелайзінговий фільтр, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), мікропроцесор (сигнальний процесор), модем, приймач синхроімпульсів від системи GPS, генератор імпульсів з фазовим автоналаштуванням частоти.

Напруга (струм) у певній точці електромережі поступає через вимірювальний трансформатор напруги (струму) на вхідний фільтр, який призначений для усунення ефекту накладання спектрів при дискретизації сигналу. Вихідний сигнал фільтру подається на аналого-цифровий перетворювач, у якому здійснюється дискретизація сигналів з певною частотою і перетворення в цифровий еквівалент. Частота дискретизації задається генератором імпульсів, синхронізованого імпульсами системи GPS. Стабільність частоти підтримується петлею зворотного зв'язку з фазовим автоналаштуванням. Дискретні значення сигналу у формі двійкових чисел поступають на мікропроцесор, або сигнальний процесор, де здійснюється їх обробка.

Вектори напруги (струму), тобто і діюче значення (модуль вектора), і початкова фаза (кут) визначаються за дискретними значеннями вхідного сигналу зазвичай за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)

$$\underline{U}(k) = U_a(k) + jU_r(k) = U_a(k)\exp[j\psi(k)] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n)\exp\left(-j\frac{2\pi}{N}nk\right), \quad (2)$$

де $U_a(k) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n)\cos\left(\frac{2\pi}{N}nk\right)$ – дійсна складова вектора напруги;

$U_r(k) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n)\sin\left(\frac{2\pi}{N}nk\right)$ – уявна складова вектора напруги;

$U(k) = \sqrt{U_a^2 + U_r^2}$ – модуль вектора напруги, тобто діюче значення синусоїдного сигналу; $\psi(k) = \arctg U_r/U_a$ – кут вектора напруги, тобто початкова фаза синусоїдного сигналу.

Синхронні вимірювання векторів напруги (струму) за допомогою дискретного перетворення Фур'є супроводжуються похибками. Частота мережі внаслідок змінного навантаження та інших об'єктивних чинників відхиляється від свого номінального значення, що призводить до частотної похибки вимірювання. Шуми, наводки, вищі гармоніки та інтергармоніки проникаючи через головну і бокові пелюстки частотної характеристики, також призводять до похибки вимірювання. Для зменшення цієї похибки необхідно збільшувати інтервал аналізу, а це приведе до збільшення динамічної похибки, обумовленої нестационарністю аналізованого сигналу.

Для зменшення похибок вимірювання, особливо динамічної похибки, доцільно застосовувати для визначення синхронізованих

векторів дискретне вейвлет-перетворення сигналу $u(n)$, яке описується співвідношенням

$$W(k, m) = \sum_{n=0}^{N-1} u(n) \cdot \psi_{k,m}(n), \quad (2)$$

де $\psi_{k,m}(n) = a_0^{-k/2} \psi((n - mb_0)/a_0^k)$ – вейвлет-функція; $\psi(n)$ – материнська функція; a_0, b_0 – сталі масштабування і зсуву; n, k, m – цілі числа.

Напруги і струми мережі внаслідок дії об'єктивних чинників є нестационарними, тому у якості материнської функції доцільно вибрати функцію Морлі (*Morlet*), роздільні здатності якої по частоті $\Delta\Omega$ і по часу Δt близькі до границі, визначеної принципом Гейзенберга. Дискретизована материнська функція Морлі визначається формулою

$$\psi(n) = \frac{1}{C_g} \exp\left(\frac{-n^2}{2N_\sigma^2}\right) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N_0} n\right) \right], \quad (3)$$

де N_σ – середня тривалість функції; N_0 – період коливань; $C_g = 2 \sum_{n=0}^{3N_\sigma-1} \exp\left[-n^2/(2N_\sigma^2)\right]$ – стала нормування.

Якщо масштабний коефіцієнт вибрати рівним $a_0^k = a_c = T_c/(T_s N_0)$, де T_c – період коливання напруги у мережі ($T_c = 20$ мс), T_s – період дискретизації цієї напруги, то модуль і початкову фазу синхронізованого вектора можна визначити за формулами

$$\begin{aligned} U(m) &= \sqrt{\operatorname{Re}^2[W(a_c, m)] + \operatorname{Im}^2[W(a_c, m)]}, \\ \psi_u(m) &= \arctg(\operatorname{Im}[W(a_c, m)]/\operatorname{Re}[W(a_c, m)]), \end{aligned} \quad (4)$$

де Re , Im – дійсна і уявна частини вейвлет-перетворення сигналу.

Висновки. Запропонований алгоритм визначення синхронізованих векторів напруг і струмів електромережі за допомогою вейвлет-перетворення, що дасть змогу підвищити точність вимірювань.

Список літератури: 1. Grid 2030: A National Vision for Electricity's Second 100 Years. – Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy, July 2003. – 45 p. 2. European Smart Grids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – European Commission, 2006. – 44 p. 3. Strategic Deployment Document for Europe Electricity Networks of the Future European Technology

Platform, European Commission, April 2010. – 54 p. **4.** *Moslehi K.* Smart Grid – A Reliability Perspective / *K. Moslehi, R. Kumar* // Paper 10SG0068, IEEE PES Conference on “Innovative Smart Grid Technologies” January 19-20, 2010, Washington, DC. **5.** *Стогній Б.С.* Особливості ОЕС України та науково-технічні проблеми забезпечення її розвитку / *Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, В.Я. Жуйков, А.Г. Баталов* // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 1. – К.: 2010. – С. 25. **6.** *Karnouskos S.* An Advanced Metering Infrastructure for Future Energy Networks / *S. Karnouskos, O. Terzidis, P. Karnouskos* // NTMS 2007 Conference, 2-4 May, 2007, Paris, France. – P. 237-243. **7.** Advanced Metering Infrastructure // NETL Modern Grid Strategy Powering our 21st-Century Economy [Електронний ресурс] Режим доступу: www.netl.doe.gov/moderngrid. **8.** Tram/Meter Data Management System - What, Why, When, and How / *Tram, Hahn and Chris Ash.* // Energy Central Network (August 29, 2005) [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://topics.energycentral.com/centers/datamanager/view/detail.cfm?aid=1061>. **9.** Smart meters-Overview/Maxim Smart Grid Solutions [Електронний ресурс] Режим доступу: www.maximic.com/smartgrid. **10.** *Phadke A.G.* A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local Frequency, and Rate of Change of Frequency / *A.G. Phadke, J.S. Thorp, M.G. Adamiak* // Trans. of IEEE on PAS. – 1983. – Vol. PAS-102. – № 5. – P. 1025-1038. **11.** IEEE C37.118-2005, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems / Institute of Electrical and Electronics Engineers, Jan. 2006. **12.** *Стогній Б.С.* Система глобального моніторинга, синхронізація і реєстрація системних параметрів ОЭС України – основа нового качества автоматизированного и оперативного управления / *Б.С. Стогній, К.В. Уцяповський, А.Н. Мольков та інші* // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 4. – С. 8-11. **13.** *Ren J.* Real Time Power System Frequency and Phasor Estimation Scheme Using Recursive Wavelet Transform / *J. Ren, M. Kezunovic* // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 26. – № 3. – P. 1392-1402. **14.** *Chen Z.* Review of PMU-based Online Applications for Dynamic Simulation, Fault Detection, and Cascading Failure Prevention / *Z. Chen, F. Li, L. Fan, P. Zhang* // Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on ELECTRIC POWER SYSTEMS, HIGH VOLTAGES, ELECTRIC MACHINES (POWER '08) Venice, Italy, November 21-23, 2008. – P. 212-217. **15.** Fast Tracking the Fundamental component in Synchrophasors applications using the Recursive Corrected Phase Wavelet Transform / *C.D.P. Crovato, V. Souza, G.S. Wojchowski, A.A. Susin* // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada (Spain), 23th to 25th March, 2010 – P. 127-132.

Статтю представив д.т.н., проф. НТУУ "КПІ" Сільвестров А.М.

УДК 621.317

Измерение параметров и обработка информации в интеллектуальной системе электроснабжения (Smart Grid) / Поворознюк Н.И., Бобривык Е.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 162 – 168.

Рассмотрены тенденции развития энергетических систем. Проанализирован современный этап развития систем электроснабжения и указаны проблемы и вызовы. Обоснована необходимость повышения качества измерений параметров энергосистем. Предложен алгоритм синхронных измерений векторов напряжения и тока на основе вейвлет-преобразований и проанализированы погрешности измерений. Библиогр: 15 назв.

Ключевые слова: интеллектуальные системы электроснабжения, вейвлет-преобразования, синхронные измерения векторов напряжения и тока.

UDC 621.317

Parameters measuring and information processing in the intellectual power system (Smart Grid) / Povorozniuk N.I., Bobrivnyk K.E. // Herald of the National Technical University

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

"KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 162 – 168.

A monitoring quality power system quality is considered. The contemporary stage of development of energy systems and indicated the problems and challenges are analysed. The necessity of monitoring power system is grounded. The structure of the system for monitoring power quality and signal analysis algorithms based on wavelet transform and classification distortion based on support vector method are proposed. Refs.: 15 titles.

Keywords: advanced metering infrastructure, wavelet transform, synchrophasor measurement.

Надійшла до редакції 10.07.2012

Н.О. РИЗУН, канд. техн. наук, доц., Днепропетровский университет имени А. Нобеля, Днепропетровск

ТЕСТИРУЕМЫЙ КАК ПОДСИСТЕМА ЗАМКНУТОГО КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Обоснованы вид и содержание параметров математической модели тестируемого как подсистемы замкнутого контура регулирования, адекватно описывающей его реакцию на тестовые задания в соответствии с уровнем профессиональной подготовленности. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: параметры, математическая модель, контур регулирования, тестовые задания, уровень профессиональной подготовленности.

Постановка проблемы. В последние два десятилетия отмечается чрезвычайно интенсивное внедрение практически во все сферы деятельности современного общества информационных технологий, что, в свою очередь, обуславливает все более возрастающее их влияние и на специфическое место человека как элемента системы управления. Являясь подсистемой в контуре регулирования, человек получает информацию в одном направлении ("вход") и отправляет ее в другом ("выход"). Известно, что замкнутость контура, передача "сообщения" или "информации" и направленное действие звеньев контура представляют собой существенные признаки процесса регулирования. Таким образом, человек является подсистемой замкнутого контура регулирования, и содержание его деятельности (в формальном смысле) состоит в получении, переработке и отправлении информации. Кроме того, человек как управляющая система обладает следующими важными свойствами: наличием внутренней регулирующей обратной связи, приспособительным характером поведения (адаптивностью) и устойчивостью системы.

Анализ литературы. В работах [1 – 4] проведен общий анализ поведения человека как элемента информационной и технической системы. Сделаны выводы о том, что:

1. Основными свойствами человека, учитываемыми при его математическом моделировании, является время его реакции, которое складывается из трех периодов: периода восприятия входного сигнала, периода принятия решения и периода совершения действия.

Основными характеристиками исследований динамики поведения человека как подсистемы замкнутого контура регулирования являются: среднее время безошибочной работы, частота отказов, среднее время восстановления, коэффициент готовности, вероятность своевременного выполнения задания (на этапах восприятия входного сигнала и принятия решения), а также инерционности его нейромускульного механизма (на этапе совершения действия). Это объясняется тем, что объектом данных исследований является человек-оператор как звено автоматизированной системы управления технологическим процессом.

При рассмотрении же тестируемого как элемента автоматизированной системы диагностики уровня профессиональной подготовленности, объектом изучения должна быть динамика мыслительного процесса как переходной характеристики преобразования высокого информационного сигнала в выходной.

2. Основной моделью поведения человека-оператора как элемента замкнутой системы является так называемое сопровождающее слежение, при котором он видит и входной сигнал, и сигнал о текущем состоянии управляемого объекта. Задача человека в данной ситуации состоит в том, чтобы удерживать разность между этими сигналами вблизи нулевого значения. В свою очередь, модели сопровождающего слежения делятся на модели с предвидением (человек видит не только текущее положение цели, но и закон изменения этого сигнала на некоторый отрезок времени вперед) и с преследованием. При компенсирующем слежении человек видит лишь информацию об отклонении управляемой величины от заданного значения, ему трудно предвидеть необходимые действия, поэтому точность компенсирующего слежения ниже, чем сопровождающего.

Проведем аналогии с моделями поведения тестируемого как элемента системы. Основной моделью его поведения является сопровождающее слежение, которое в зависимости от структуры и состава выходного сигнала (только подтверждение принятия решения текущего тестового задания, или дополнительная информация о количестве возможных правильных ответов (задания с множественным выбором), оставшемся времени на формирование ответа на текущий вопрос, оставшемся времени на весь тестовый сеанс, промежуточном результате тестирования, возможности обращения к справочному материалу, возможности возврата на предыдущий вопрос, возможности свободного выбора последовательности вопросов и т.д.), может трансформироваться в аналог модели сопровождающего слежения с преследованием или компенсирующего слежения.

3. Наибольшее распространение получили следующие квазилинейные модели: модель Дж. Хендерсона

$$W(s) = \frac{k(1 + T_1s)}{(T^2s^2 + 2\xi Ts)s} e^{-\tau s}, \quad \text{модель Д. Макруера и Е. Крендела}$$

$$W(s) = \frac{k(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} e^{-\tau s}. \quad \text{Однако, данные модели опять же}$$

рассматривают особенности деятельности человека оператора, не уделяя специального внимания динамике переходных процессов преобразования входного информационного сигнала с точки зрения мыслительных процессов тестируемого.

Целью статьи является обоснование вида и содержания параметров математической модели тестируемого как подсистемы замкнутого контура регулирования, описывающей его реакцию на тестовые задания адекватно реальному мыслительному процессу, исходя из уровня его профессиональной подготовленности.

Результаты исследований. В процессе исследований автором была разработана схема тестируемого как подсистемы замкнутого контура регулирования (рис. 1).

В соответствии с предложенной схемой, в сложных системах управления функции тестируемого имеют ряд особенностей, которые относятся к каждому из этапов его деятельности.

Этап настраивания на предметную область. Согласно теории тестирования, существуют различные формы организации информации, поступающей на "вход" тестируемого, а именно: тестовые задания открытого типа – на дополнение и на свободное изложение; тестовые задания закрытого типа – с выбором одного верного ответа, с выбором нескольких верных ответов, с градуированными ответами, на установление соответствия, на установление правильной последовательности и т.д.

Каждое тестовое задание фактически является моделью реальных объектов, понятий, ситуаций, а также отношений между отдельными объектами, понятиями, ситуациями. Представление данных моделей условно можно представить как организованную по некоторым формальным принципам структуру символических отображений (формул, формулировок, графических изображений). Причем, один и тот же объект, понятие, ситуация может быть отображена (формализована) различными способами, с помощью различных форм тестовых заданий и на различных уровнях обобщения моделируемой ситуации и сложности постановки проблемы.

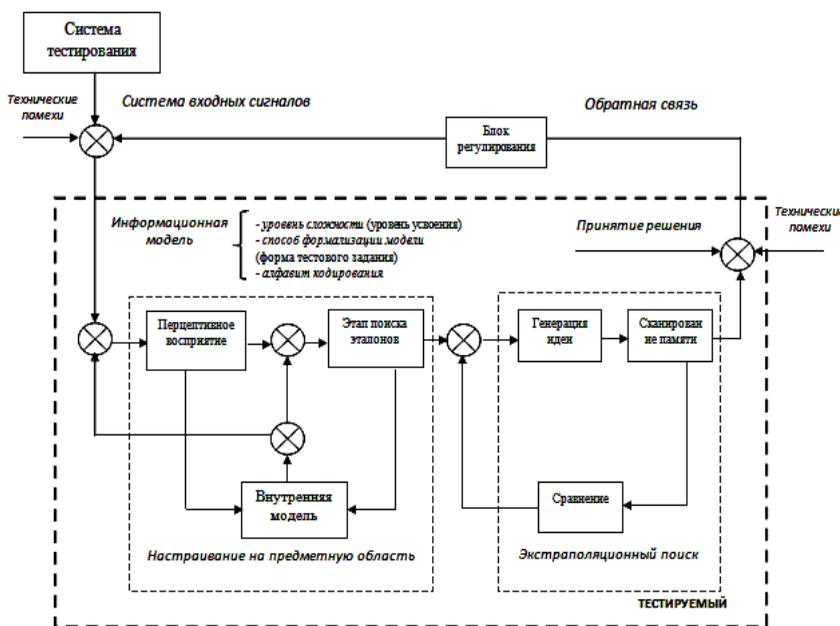


Рис. 1. Схема тестируемого как подсистемы замкнутого контура регулирования

Таким образом, тестируемый, получая одну и ту же информацию об объекте, понятии, ситуации, может иметь дело с разными их информационными моделями. Существенными признаками понятия информационной модели в системе тестирования являются: уровень сложности (обобщенности представления моделируемой обстановки (объекта) в тестовом задании); способ формализации модели (форма тестового задания); алфавит кодирования (формулы, текст, графика, анимация и т.д.).

С точки зрения психологии главной функцией тестируемого при работе с полученной информационной моделью является необходимость *перцептивного* восприятия, для которого характерно зрительное восприятие и выделение в объекте признаков, которые служат элементами при установлении связей и отношений при создании целостного образа. Следующее за ним *опознавательное* действие, происходит в буферной памяти опознания, служащей местом встречи информации, идущей из внешнего мира и поступающей из долговременной памяти. Оно начинается с выделения информативных

признаков в связи с выдвинутыми перцептивными гипотезами, перевода поступившей информации на язык схем, оперативных единиц восприятия и приводит к настраиванию на определенную предметную область памяти человека.

С точки зрения теории информации последовательные процессы перцептивного восприятия и опознавания представляет собой ни что иное, как процесс "*декодирования*" воспринятой информации – то есть с мысленной реконструкции (узнавания) тех реальных признаков, объектов, понятий, знания о которых необходимы для решения стоящих перед тестируемым задач и формированию образа или собственной, образно-концептуальной модели (ОКМ) проблемной ситуации у субъекта.

В результате завершения этапа получения и перекодирования информации в системе "тестируемый" создается целостный образ ситуации (или "внутренняя модель"), на основании которой он может приступать к принятию решения – формированию ответа на тестовое задание.

Этап экстраполяционного поиска. В отличие от предыдущего этапа, где происходило преобразование информации по форме (перекодирование), на данном этапе информация преобразуется по содержанию. Происходит манипулирование образом или моделью ситуации, направленное на целесообразное и адекватное задаче преобразование и переструктурирование этого образа. Целесообразность и адекватность задаче указанных преобразований может быть понята так. Если на фазе построения образа происходит уподобление воспринимающих систем свойствам воздействия (А.Н. Леонтьев), то на фазе *экстраполяционного поиска* происходит трансформация и уподобление образа объекта цели и стоящей перед субъектом задаче.

Главной функцией тестируемого на этом этапе является генерация вариантов правильных решений на основании сформировавшейся на этапе настраивания на предметную область внутренней модели (образа), пригодной для использования. Процесс переработки информации представляет собой внутренний контур с обратной связью, предполагающий циклическое выполнение операций *генерации* идеи (варианта решения задания), *сканирования* памяти как механизма преодоления излишней и избыточной информации (он испытывает на себе влияние вышележащих уровней переработки информации, которые задают ему поисковые эталоны и направление сканирования) и *компарации* (анализа) преимуществ одной идеи (решения) перед другой.

Этап принятия решения. Факт принятия решения в процессе тестирования. С точки зрения психологии этап принятия решения

характеризуется стабилизацией процесса мышления и завершается совершением исполнительного действия – выбора (ввода) варианта (-ов) решения. С точки зрения теории информации данный этап описывается затухающей фазой колебательного процесса, стабилизирующегося на определенном уровне, характеризующем степень соответствия принятого решения поставленной перед тестируемым задаче. Время, затраченное на этот этап, характеризуется психомоторными качествами субъекта.

Результаты решения тестового задания формируют сигнал обратной связи, несущий информацию о его текущем состоянии – факте решения и стимулирующий подачу нового тестового задания и, как следствие, к возникновению следующих колебательных процессов мышления и переработки информации. Целевой уровень следующего тестового задания (уровень сложности, уровень комплекса проверяемых профессиональных навыков [5]) определяется случайным образом (обратная связь равна 1) или по определенному алгоритму (в зависимости от значения сигнала обратной связи).

На основании перечисленных выше особенностей автором была разработана модель, отличающаяся от предложенных ранее тем, что она представляет собой вариант формализации динамики поведения тестируемого в процессе выполнения тестового задания с точки зрения интерпретации процесса принятия решения как совокупности этапов мыслительного процесса.

На основании проведенных выше аналогий в данной модели коэффициенты передачи интерпретируются как различные составляющие уровней соответствия совокупности профессиональных знаний рассматриваемой проблемной ситуации, временная составляющая – как скорость выполнения тестируемым отдельных элементов мыслительной деятельности. С точки зрения элементов системы управления предложенная модель отображает свойства тестируемого как звена, выполняющего функции сопровождающего слежения с возможностью реализации функции преследования (при наличии возмущающего воздействия $p(t)$) (рис. 2).

В рассматриваемой модели: k_1 – уровень соответствия содержания долговременной памяти рассматриваемой проблемной ситуации; T_1 – скорость перцептивного мышления (в ед. времени); k_2 – уровень освоенности проблемной ситуации (уровень устойчивости знаний); T_2 – скорость продуктивного мышления (в ед. времени); T_3 – уровень логического мышления (эффективность механизмов сканирования памяти); k_3 – уровень эффективности механизмов принятия решения; T_4 – скорость компарации (в ед. времени); $z(t)$ – заданный уровень сложности тестового задания – входной сигнал; $[p(t)]$ – внешние воздействия

тестовой системы, обеспечивающие реализацию функции преследования (подсказки, сообщение о времени выполнения задания, промежуточном количестве правильных ответов) – возмущающее воздействие; $\varepsilon(t)$ – технические сбои в работе тестовой оболочки; $m(t)$ – образно-концептуальная модель проблемной ситуации; $g(t)$ – вариант решения задачи; $a(t)$ – вектор подходящих эталонов для сравнения; $c(t)$ – результат компарации; $r(t)$ – вариант решения задачи; $u(t)$ – результат решения тестового задания; $W_k(s)$ – передаточная функция системы диагностики уровня профессиональной подготовленности.

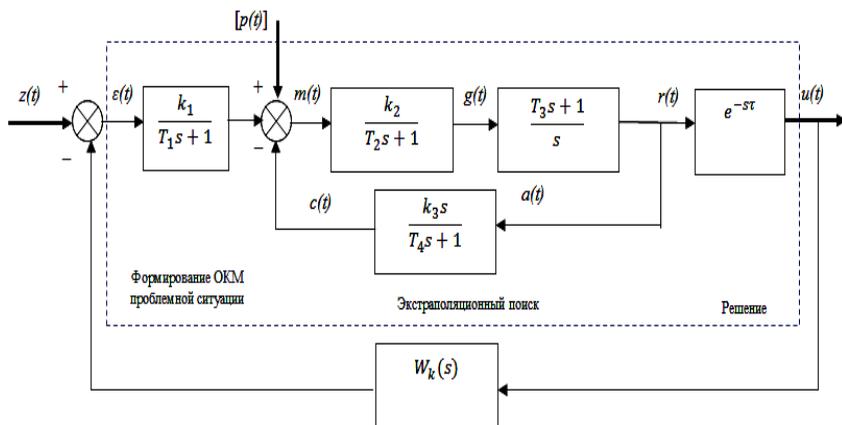


Рис. 2. Математическая модель тестируемого в системе замкнутого контура регулирования процессом контроля профессиональной подготовленности

Передаточная функция *тестируемого* как звена, выполняющего функции сопровождающего слежения, выражается следующим образом:

$$W_T(s) = \frac{K_1(T_{k1}^2 s^2 + T_{k2}s + 1)e^{-\tau s}}{(T_{k3}^2 s^2 + T_{k4}s + K_2)(T_1 s + 1)s},$$

где $K = k_1 k_2$, $T_{k1} = \sqrt{T_3 T_4}$, $T_{k2} = T_3 + T_4$, $T_{k3} = \sqrt{T_2 T_4}$, $T_{k4} = T_4 + T_2 + k_2 k_3 T_3$, $K_2 = k_2 k_3 + 1$.

Выводы. Таким образом, автором обоснован вид и содержание параметров математической модели тестируемого как подсистемы замкнутого контура регулирования, адекватно описывающей его реакцию на тестовые задания исходя из цели проводимого замера уровня профессиональной подготовленности, что позволит в дальнейшем

оценить надежность и точность функционирования автоматизированной системы диагностики уровня профессиональной подготовленности как в режиме классического, так и адаптивного тестирования, а также количественно оценить требования к профессиональным навыкам проверяемого персонала.

Список литературы: 1. Павловская О.О. Методы определения параметров линейной математической модели человека-оператора / О.О. Павловская // Вестник ЮУрГУ. Серия "Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника". – 2007. – Вып. 5. – № 7 (79). – С. 41-44. 2. Жабреев В.С. Модели и оценка человеческого фактора больших систем: учебное пособие / В.С. Жабреев, О.О. Павловская, К.В. Федяев. – Челябинск: Челяб. ин-т путей сообщения, 2007. – 219 с. 3. Roupko K. The optimization of connection between Human and techniques in Man-Machine Systems // Preprints of JFAC-JFORS Symposium (Varna, Bulgaria, 8-11 oct. 1974). – P. 419-426. 4. Янг Дж. Ф. Робототехника / Дж. Ф. Янг. – Л.: Машиностроение, 1979. – 300 с. 5. Абашиш В.Г. Автоматизация процесса определения психофизиологического состояния оператора автоматизированного рабочего места в АСУТП. Автореферат дис. к.т.н. (05.13.06). – Орел: ОрелГТУ. 2007. – 20 с. 6. Митрохин Ю.В. Разработка интерактивной модели развития технологических процессов железнодорожного транспорта. Автореферат дис. к.т.н. (05.13.06). – Ростов-на-Дону: ИрГУПС. – 2010. – 24 с. 7. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы / И.Е. Цибулевский. – М.: Наука. – 1981. – 288 с. 8. Шеридан Т.Е. Системы человек-машина: модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором / Т.Е. Шеридан, У.Р. Феррелл. – М.: Машиностроение, 1980. – 400 с. 9. Пат. 58657 Україна, МПК G06F 7/00. Спосіб проведення комп'ютерного тестування знань студентів; замовник та патентовласник: Тараненко Ю.К., Різун Н.О. – № u201009376, заявл. 26.07.2010; опубл. 26.04.2011. Бюл. № 8, 2011.

Статью представил д.т.н., с.н.с. Днепрпетровского университета им. Альфреда Нобеля Тараненко Ю.К.

УДК 681.3:378.146

Особа, що тестується, як підсистема замкнутого контуру регулювання / Різун Н.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 169 – 176.

Обґрунтовано вигляд і зміст параметрів математичної моделі особи, що тестується, як підсистеми замкнутого контуру регулювання, яка адекватно описує його реакцію на тестові завдання виходячи з рівня професійної підготовленості. Іл.: 2. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: параметри, математична модель, контур регулювання, тестові завдання, рівень професійної підготовленості.

UDC 681.3:378.146

Testee as a subsystem of closed contour of regulation/ Rizun N.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 169 – 176.

The form and content of the parameters of the mathematical model testee as a subsystem of the closed contour of regulation, adequately describing his/her reaction to the test tasks based on the objective level of professional readiness was grounded. Figs.:2. Refs.: 9 titles.

Keywords: parameters, mathematical model, contour of regulation, test tasks, level of professional readiness.

Поступила в редакцію 15.08.2012

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

А. СЕЛИВАНОВ, магистр, ассистент, Институт электроники и вычислительной техники, Рига, Латвия

КОМПЬЮТЕРНО-УПРАВЛЯЕМАЯ СИСТЕМА ДИСКРЕТНОГО СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ

В статье предложен подход к решению проблемы разработки компьютерно-управляемой системы дискретного стробоскопического преобразователя сигналов. Система разработана в модульной архитектуре и может быть адаптирована для конкретных применений. Рассмотрено аппаратное обеспечение, цифровое управление, сбор и передача данных цифрового преобразователя и разработка компьютерной программы управления. Ил: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: компьютерно-управляемая система, дискретный стробоскопический преобразователь сигналов, сбор и передача данных.

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время сбор данных с помощью сверхширокополосных (UWB) сигналов требуется во многих применениях, таких как почвопроникающие радиолокаторы (GPR) [1, 2], радиолокаторы "видения сквозь стену" (TWI) [3], импульсная рефлектометрия (TDR) [4], медицинская визуализация [5] и в других применениях, где должны быть определены свойства материалов в среде распространения.

Известен ряд различных подходов сбора данных от повторяющихся сигналов – сбор данных в эквивалентном времени [6, 7], сбор сигналов в эквивалентном времени комбинируется со сбором данных в реальном времени [3] с помощью ультра-быстрых аналого-цифровых преобразовательных микросхем [3] и т.д. Каждый подход имеет ряд достоинств и недостатков, стоимость разработки аппаратуры сбора данных в режиме реального времени и комбинированного сбора данных высока, а достижимая частота дискретизации является относительно низкой. Сбор данных в эквивалентном времени и аппаратура дискретного стробоскопического преобразователя сигналов (DSSC) рассмотрены в этой статье.

Контроль DSSC является аппаратным, управляемым с помощью компьютера. В последние годы всё больше применяются встроенные системы, как PC104 [3]. DSSC имеет цифровые данные на выходе преобразователя. Так как управление DSSC и визуализация выходных данных проводится на компьютере, важно обеспечить соответствующий требуемой скорости интерфейс передачи данных. Универсальным средством и в последнее время часто используемым решением передачи

цифровых данных являются преобразователи параллельного и последовательного интерфейса на USB компаний FTDI [8].

В различных применениях компьютерное управление и визуализация проводится на стационарном или на портативном оборудовании, поэтому важно разработать универсальную компьютерную программу. Часто программы разрабатываются только для одной операционной системе (ОС), что ограничивает универсальность системы [8].

Для обработки данных в специфических применениях, существуют бесплатные библиотеки, разработанные специалистами конкретного направления, например, библиотека iGeos [9] для обработки и визуализаций данных прикладной геофизики.

Цель статьи – разработка архитектуры реконфигурируемой аппаратуры и методики сбора данных сверхширокополосных (UWB) сигналов, управляемой компьютером. В статье рассматривается способ соединения стробоскопического преобразователя, периферийных устройств и компьютера для передачи данных и установки/считывания параметров. Предложенный подход, применение которого позволяет использовать аппаратуру для различных назначений, построен на модульном принципе. Аппаратура, как и программа сбора данных и контроля, легко реконфигурируема.

Общая архитектура системы. Предлагаемая электронная система разработана по модульной архитектуре. Основные функциональные блоки могут быть легко реконфигурируемы и адаптированы для конкретных приложений. В целом система может быть разделена на три основные части – аппаратура стробоскопического преобразователя, микроконтроллер с периферийными устройствами и персональный компьютер или модуль встроенной системы (рис. 1).

Входной аналоговый сигнал подается на вход тактового компаратора стробоскопического преобразователя (рис. 2.). Тактовый компаратор сравнивает входной сигнал с сигналом обратной связи по заднему фронту сигнала строба. Тактовые импульсы или сигналы строба сдвигаются по времени на интервал Δt_S после каждой выборки на протяжении заданного окна времени (рис. 3). Выходной сигнал компаратора подается на счетчик типа "вверх-вниз" (*up-down counter*), выходом которого является цифровой сигнал. Выходные данные подаются также в цепь обратной связи через цифровой переключатель динамического диапазона и преобразуются обратно в аналоговый сигнал через параллельный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Выходные данные счетчика подаются на блок управления и пересылаются на компьютер.

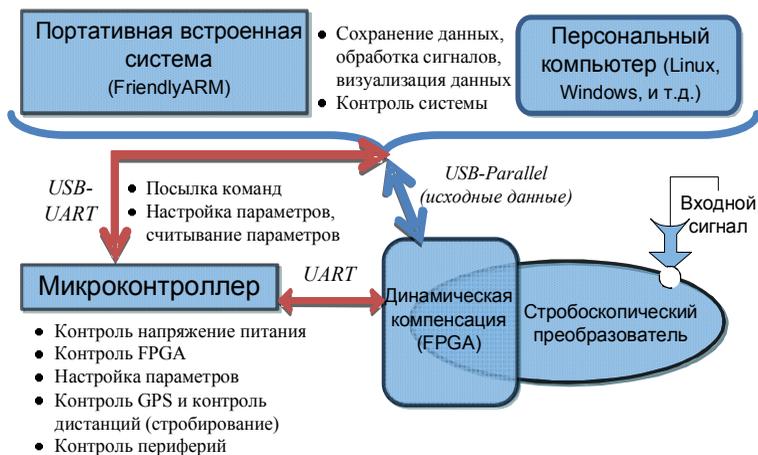


Рис. 1. Общая архитектура системы

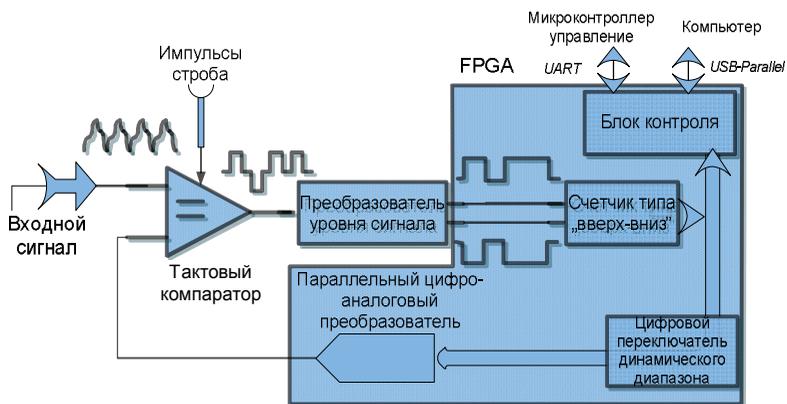


Рис. 2. Блок стробоскопического преобразователя

Используемый тактовый компаратор собран на дискретных транзисторах [7], работающих в режиме малого сигнала или на основе туннельного диода [6]. Высокая чувствительность [6, 7] и очень высокая

(около 100 ГГц) теоретическая ширина полосы частот сигналов может быть достигнута с помощью предлагаемых подходов.

Часть стробоскопического преобразователя имплементирована в микросхему FPGA (рис. 2), которая включает в себя алгоритм динамической компенсации и повышает эффективность и быстродействие системы.

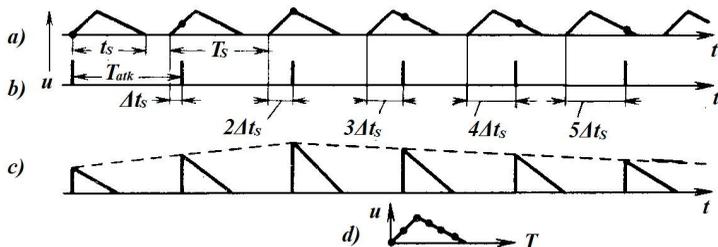


Рис. 3. Стробоскопическое преобразование сигнала

Для настройки параметров FPGA и контроля периферийных устройств используется микроконтроллер TI MSP430. Для связи микроконтроллера с компьютером использован преобразователь FT232. Исходные данные FPGA подаются на компьютер через преобразователь USB-Parallel FT245, обеспечивая высокую скорость передачи данных.

Разработка программного обеспечения. Для контроля системы стробоскопического преобразователя, визуализации цифровых данных и обработки сигналов требуется разработка программного обеспечения, которое не должно содержать коммерческие компоненты. Для начального тестирования интерфейсов передачи данных и контроля системы использовалась программа графического программирования LabView. Начальный приём данных, визуализация и предварительная обработка сигналов осуществлялись в программе компьютерной алгебры и моделирования Matlab, которая обладает множеством специфических инструментов (и примеров) для обработки сигналов разных применений.

LabView и Matlab удобны при разработке, но не годятся для комбинирования исходных кодов разных библиотек и распространения, потому основное программное обеспечение (ПО) разрабатывалось на языке C++ при использовании Qt 4.8.1. [10] – кросс-платформенного инструментария разработки ПО на языке программирования C++ и библиотек других производителей на платформе Windows. Программирование осуществляется в интегрированной среде разработки Qt Creator IDE. Интерфейс разрабатывается в визуальной среде

разработки графического интерфейса Qt Designer. Для обеспечения совместимости интегрированной среды разработки, плагина Qt Designer, библиотеки QWT, плагина QWT для Designer и библиотеки QExtSerialPort были скомпилированы с исходного кода с помощью инструмента Qmake и компиляторного инструментария MinGW. Отдельные части доступны в скомпилированных версиях, но некоторые из них не совместимы с новейшей библиотекой Qt. Надёжней оказалось самим скомпилировать инструменты разработки и библиотеки.

Qt позволяет запускать написанное с его помощью ПО в большинстве современных операционных систем (Windows, Linux, Unix, Mac OS X, Embedded Linux) путём простой компиляции программы для каждой ОС без изменения исходного кода [10]. Qt имеет большое количество встроенных библиотек и библиотек сторонних производителей, предназначенных для специальных целей. Кросс-платформенный инструментарий выбран для разработки ПО на платформе Windows и для применения как на персональных компьютерах, так и на портативных устройствах с операционной системой Embedded Linux.

Интерфейсы передачи данных. *USB-UART (Последовательный интерфейс)* – интерфейс управления, осуществлен с помощью сторонней библиотеки QExtSerialPort 1.2 Beta. Были рассмотрены несколько альтернативных библиотек, но они имеют меньше функциональных возможностей.

В начале программы проводится сканирование всех доступных портов последовательного интерфейса с помощью функций *enumerator()*. Пользователь конфигурирует параметры последовательного интерфейса (скорость, число битов и стоп битов, паритет) в диалоговом окне и открывает порт. Статус порта виден на статусной панели. Виртуальный последовательный порт конфигурирован в режиме событий (*event-mode*) для сбора данных без задержки. Каждый принятый байт в буфере выдаёт сигнал триггера и происходит чтение байтов. Используется режим событий (*event-mode*) вместо стандартного режима опроса (*polling-mode*) для приёма данных в реальном времени. Функция "приятие данных" вызывается функцией триггера (*event notifier*), проверяющей наличие байтов. Эти функции взаимосвязаны программным механизмом Qt – *signal-slot*.

USB-Parallel (Параллельный интерфейс) интерфейс управления осуществлен с помощью библиотеки, прилагаемой к FTDI FT245 микросхеме, D2XX. Максимальная достижимая скорость передачи данных – 1 MB/s. Микросхема FT245 используется вместе с микросхемой памяти EEPROM, в которой хранятся программируемые идентификаторы

Vendor ID (VID), Product ID (PID) и строка описание для идентификации устройства при подключении. D2XX библиотека содержит привязки драйверов для операционных систем Windows и Linux и набор функций для управления параллельным потоком данных – буферизация данных, приём и передача данных, идентификация и инициализация устройства. Заранее заданное количество данных считывается из стробоскопического блока преобразователя и сохраняются для обработки и отображения на жёстком диске компьютера. После сбора данных на микроконтроллер M-MCU посылается команда "ready", и инициализируется следующий цикл сбора данных.

Хранение данных и отображение. При инициализации DSSC параметры сохраняются в оперативной памяти и также в текстовом файле на жёстком диске компьютера в понятном пользователю формате ASCII. При каждом изменении параметров создаётся новый файл. Полученные данные также сохраняются в текстовом файле, но в формате исходных данных (hex).

Визуализация данных может быть осуществлена в двух режимах, в зависимости от применения. Режим реального времени, когда каждая принятая выборка отображается на дисплее, используется в медицинских применениях, например, в детекторе дыхания человека.

Более распространённый режим накопления, когда на дисплее отображается накопленный массив данных с точки отсчёта (триггера), используется во всех остальных применениях стробоскопического преобразователя – GPR, TWI, TDR и в медицинской визуализации.

Для отображения данных в графике в Qt программе используется библиотека инструментов "Изображение технических графиков QWT". Эта библиотека дает возможность отображения данных в графиках различных стилей и позволяет пользователям масштабировать и двигать отображение для лучшего анализа сигналов. Библиотека также предоставляет разные стили регуляторов и слайдеров для настройки параметров.

Выводы

Представленная система является универсальной системой сбора данных сверхширокополосных сигналов с компьютерным управлением. Система реконфигурируема для различных применений и научных исследований.

Проводилась компиляция и тестирование разработанной программы для встроенной системы FriendlyARM mini6410 с операционной системой Embedded Linux с успешными результатами. Разработка программы на базе Qt делает её универсальной и эффективной, однако приходится

сталкиваться с проблемами кросс-компиляции и особенностями операционных систем.

Разработанную систему планируется интегрировать в реальные изделия, как GPR, TWI и детектор дыхания и проводить исследования и эксперименты.

Будущая разработка будет включать в себя обновление микроконтроллера от TI MSP430 16-битный серии на более мощный 32-битный микроконтроллер ARM Cortex M3 для более эффективного, надежного и быстрого управления системой. Планируется усовершенствовать графический пользовательский интерфейс и программу обработки сигналов для визуализации данных различных применений.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта Института электроники и вычислительной техники No. 2010/0307/2DP/2.1.1.0/10/APIA/VIAA/078 "High sensitivity superwideband radar technology" (LoTe), финансируемого совместно с Европейским Фондом Регионального Развития.

Статью представил D.h.sc. comp. E. Hermanis.

Список литературы: 1. Ground Penetrating Radar Systems and Inspection Services / Electronic resource / 2012. – Link: <http://www.penetradar.com>. 2. Radar Systems, Inc. - Zond and Python GPR - Ground Penetrating Radar / Electronic resource / 2012. – Link: <http://www.radsys.lv>. 3. *Chen C.* Application of Equivalent-Time Sampling Combined with Real-Time Sampling in UWB Through-Wall Imaging Radar / *C. Chen, S. Wu., S. Meng, J. Chen, G. Fang, H. Yin* – Beijing, 2011 First International Conference on Instrumentation Measurement Computer Communication and Control, 2011. – P. 721-724. 4. *Strackx E.* Measuring Material / Tissue Permittivity by UWB Time-domain Reflectometry Techniques / *E. Strackx, D. Maarten, G. Vandenbosch, P. Reynaert, P. Leroux.* – Rome, Italy, 2010, International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies edition: 3. 5. *Klemm M.* Breast Cancer Detection Using Symmetrical Antenna Array / *M. Klemm, I.J. Craddock, J. Leendertz, A.W. Preece, R. Renjamin.* – Proc. The Second European Conference. Antennas and Propagation (EuCAP 2007), Nov, 2007. – P. 1-5. 6. *Beiner E.* The Experimental Research of a Digital Sampling Signal Converter / *E. Beiner, K. Krumins, and V. Peterson/* – Riga, Latvia, Automatic Control and Computer Sciences. – 2008. – Vol. 42. – №. 1. – P. 40–44. 7. *Agafonovs N.* Design and evaluation of a stroboscopic signal converter based on discrete transistor clocked comparator / *N. Agafonovs, G. Supols.* – Tallin, 2012, 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012). 8. *Najeb J.M.* 12-channel USB data acquisition system for QT dispersion analysis / *J.M. Najeb, A. Ruhullah, S.H. Salleh.* – Penang, 2005, Proceedings of the International Conference on Robotics, Vision, Information and Signal Processing ROVISP2005. 9. *Morozov I.* Interactive 3D/2D visualization for geophysical data processing and interpretation / *I. Morozov, G. Chubak, S. Blyth.* – Canada, Computers & Geosciences, 2009. – Vol. 35. – Issue 7. – P. 1397-1408. 10. Nokia Corp. - Qt - Cross-platform application and UI framework / Electronic resource / 2012. – Link: <http://qt.nokia.com>.

УДК 681.3:378.146

Комп'ютерно-керована система дискретного стробоскопічного перетворювача сигналів / Ссліванов А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 177 – 184.

У статті запропонований підхід до рішення проблеми розробки комп'ютерно-керованої системи дискретного стробоскопічного перетворювача сигналів. Система розроблена в модульній архітектурі і може бути адаптована для конкретних вживань. Розглянуто апаратне забезпечення, цифрове управління, збір і передачу даних цифрового перетворювача і розробку комп'ютерної програми управління. Іл. 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: комп'ютерно-керована система, дискретний стробоскопічний перетворювач сигналів, збір і передача даних.

UDC 681.3:378.146

Computer manageable system of discrete stroboscopic signal converter / Selivanovs A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – № 62 (968). – P. 177 – 184.

In this paper a computer manageable system of discrete stroboscopic signal converter is proposed. System is developed in modular architecture style and is easy adaptable for specific applications. Stroboscopic converter's hardware, digital control, data acquisition and transmission are discussed. This paper mainly focuses on development of digitally controllable system and interface to PC. Figs.:3. Refs.: 10 titles.

Keywords: computer manageable system, discrete stroboscopic signal converter, data acquisition and transmission.

Поступила в редакцію 31.07.2012

С.Г. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОЙ ИТС НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ GERT-СЕТИ

На основе теоретико-графового подхода моделирования разработана методика математического моделирования защищенной информационно-телекоммуникационной системы (ИТС), в виде многослойной GERT-сети. Определены наиболее сложные с вычислительной точки зрения этапы моделирования. Разработан алгоритм эквивалентных, упрощающих преобразований GERT-сети. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: математическая модель, GERT-сеть, защищенная ИТС.

Постановка проблемы. В настоящее время существует множество средств защиты информации, функционирующих на разных уровнях модели сетей будущего поколения NGN-сетей (Next Generation Network), при этом большинство из этих средств доступны для использования. Одной из основных особенностей существующих средств защиты информации является комплексность в подходах обеспечения основных услуг безопасности, которая возможна объединением различных протоколов, механизмов и алгоритмов в рамках конечного аппаратного или программного изделия. В таких условиях возникает необходимость согласования возможных режимов и параметров функционирования средств защиты информации на разных уровнях NGN-сети между собой.

Анализ литературы [1 – 8] показал, что многие задачи, возникающие при проектировании, тестировании, оптимизации и оценке вероятностно-временных характеристик, а также параметров защищенных ИТС значительно упрощаются, если их рассматривать на теоретико-графовых моделях. Однако задача нахождения закона распределения для моделей большой размерности в данном подходе решается с большой погрешностью (до 20%), что недопустимо в ряде задач, связанных с проектированием систем защиты информации в ИТС. В работах [4 – 6] авторы связывают решение указанной проблемы с разработкой и построением математических моделей в виде GERT-сетей, при этом приведенные результаты моделирования говорят о повышении точности получаемых результатов до 10 – 15%. Однако, анализ существующих методов и методик построения GERT-сетей показал полное отсутствие в этом направлении работ, использующих подход многослойного моделирования.

Поэтому **целью статьи** является разработка и использование методики математического моделирования защищенной ИТС на основе многослойной GERT-сети.

Основные этапы математического моделирования с помощью многослойной GERT-сети. Как показали результаты проведенных исследований [4 – 6], математическое моделирование многоуровневой защищенной ИТС с помощью многослойной GERT-сети может быть осуществлено при выполнении следующих условий:

- для обеспечения услуг безопасности используется несколько средств защиты информации на разных уровнях NGN-архитектуры в комплексе;

- процесс функционирования средств защиты информации на каждом из уровней NGN-архитектуры может быть описан с помощью однослойной GERT-сети;

- процесс функционирования защищенной ИТС в целом представляется в виде последовательных переходов из одного состояния в другое: $S_1^{(\ell)}, S_2^{(\ell)}, \dots$, где $\ell = \{1, 2, 3\}$ – номер уровня NGN-архитектуры;

- каждому из переходов приписывается вероятность $p_k^{(\ell)}$, где k – номер перехода на одном из уровней;

- результирующие вероятности прохождения последовательности состояний на одном уровне в многослойной GERT-сети определяются по правилу умножения $P\{S_{k_0}^{(\ell)}, \dots, S_{k_n}^{(\ell)}\} = p_{k_0}^{(\ell)} \times \dots \times p_{k_n}^{(\ell)}$;

- результирующие вероятности прохождения последовательности состояний между уровнями многослойной GERT-сети определяется аналогично предыдущему правилу $P\{S_{k_0}^{(\ell_j)}, \dots, S_{k_n}^{(\ell_m)}\} = p_{k_0}^{(\ell_j)} \times \dots \times p_{k_n}^{(\ell_m)}$;

- $\forall (S_k^{(\ell_j)}, S_k^{(\ell_m)})$ и $(S_{k_j}^{(\ell)}, S_{k_m}^{(\ell)})$ соответствуют условные вероятности $p_k^{(\ell_j, m)}$ и $p_{k_j, m}^{(\ell)}$ соответственно.

Анализ и проведенные исследования процесса функционирования информационно-телекоммуникационных систем позволили определить, что основными этапами математического моделирования защищенной ИТС на основе многослойной GERT-сети являются следующие.

1. Определение уровня детализации (стратификация) и структуризация математической модели защищенной ИТС.

2. Представление защищенной ИТС в виде пространства многослойной GERT-структуры $\bar{G} = (G, C)$, где $G = (\tilde{N}, \tilde{A})$ – подпространство уровней моделирования, $C = (N, A)$ – подпространство стохастических сетей, \tilde{N}, N – GERT-узлы (вершины), \tilde{A}, A – ветви (дуги) GERT-сети.

3. Определение условной вероятности и производящей функции моментов каждой ветви.

4. Вычисление \tilde{W} и W -функций каждой ветви в подпространствах G и C соответственно.

5. Эквивалентные, упрощающие преобразования многослойной GERT-сети.

6. Переход от \tilde{W} и W -функций многослойной GERT-сети к характеристическим функциям $\chi(\zeta)$ и вычисление действительных $\chi_{\text{Re}}(\zeta)$ и мнимых $\chi_{\text{Im}}(\zeta)$ значений характеристических функций дуг в узлах интерполяции.

7. Описание процесса передачи от истока к выходному узлу многослойной GERT-сети на основе топологического уравнения Мейсона.

8. Преобразование многослойной GERT-сети по формуле Мейсона в эквивалентную сеть, состоящую из одной ветви, характеризующейся эквивалентной W -функцией $W_E(s) = p_E M_E(s)$, где p_E – вероятность прохождения стока, $M_E(s)$ – эквивалентная производящая функция моментов.

9. Вычисление действительных $\tilde{X}_{\text{Re}}(\zeta)$ и мнимых $\tilde{X}_{\text{Im}}(\zeta)$ значений эквивалентной характеристической функции $\tilde{X}_E(\zeta) = X_E(\zeta)e^{-0.5\zeta^2}$ GERT-сети в узлах интерполяции.

10. Определение закона распределения и плотности распределения вероятностей искомой случайной величины.

11. Нахождение математического ожидания и дисперсии времени прохождения GERT-сети.

Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных этапов математического моделирования.

Стратификация математической модели защищенной ИТС является субъективным процессом, и только разработчик, исходя из своего понимания цели моделирования, может определить уровни детализации, число и взаимосвязи элементов. Для защищенных ИТС рекомендуется определить следующее разбиение на страты.

1) K -страта. Низкоуровневые алгоритмы обработки данных и защиты информации.

2) $(K + 1)$ -страта. Механизмы обеспечения требуемых услуг безопасности.

3) $(K + 2)$ -страта. Низкоуровневое моделирование каналов связи путем задания их типов и параметров, необходимых для выполнения поставленной задачи.

4) $(K + 3)$ -страта. Моделирование каналов связи среднего уровня (с учетом специфики разбиения данных на информационные пакеты и кадры).

5) $(K + 4)$ -страта. Моделирование протоколов и средств защиты информации, коммуникационных протоколов транспортного уровня, протоколов маршрутизации уровня доступа, протоколов, выполняющих транспортные функции и функции доставки сообщений между конечными узлами.

6) $(K + 5)$ -страта. Моделирование приложений с помощью команд нескольких типов, в том числе команд обработки данных, отправки и чтения сообщений, чтения и записи данных в файл, установления сессий и приостановки программы до получения сообщений.

7) $(K + 6)$ -страта. Моделирование информационного трафика различных сетевых служб с учетом характерных особенностей, основных показателей и законов распределения искомым случайных величин.

8) $(K + 7)$ -страта. Моделирование сетей на верхнем уровне абстракции.

После того как разработчик определился с уровнем детализации математической модели защищенной ИТС можно приступить ко второму этапу математического моделирования, представлению защищенной ИТС в виде пространства многослойной GERT-структуры.

На третьем этапе моделирования, при определении условных вероятностей и производящих функций моментов ветвей многослойной GERT-сети, следует учитывать многообразие распределений, которыми могут характеризоваться отдельные дуги (пуассоновское, экспоненциальное, фрактальные распределения и др.). Например, как указано в ряде источников [1, 4 – 6] случайная величина времени доставки информационных пакетов в канале связи может быть распределена по экспоненциальному закону, а тот же самый показатель, но уже характеризующий поведение мультисервисного информационного трафика на маршруте имеет фрактальные свойства. Кроме того, как показали исследования, при математическом моделировании сложных технических систем нельзя пренебрегать возможностью использования непрерывных распределений произвольного вида. Подобного рода данные, чаще всего, определяются эмпирическим путем [4, 5]. Особенно актуальной эта задача представляется на этапе определения производящей функции моментов ветвей, соединяющих различные уровни NGN-архитектура, когда заранее сложно точно выбрать закон распределения вероятности случайной величины.

Следует заметить, что от точности определения условной вероятности и производящей функции моментов зависит результат следующего этапа математического моделирования – вычисления \tilde{W} и W -функций каждой ветви многослойной GERT-сети. На данном этапе \tilde{W} и W -функции вычисляются с помощью выражения:

$$W_{i,j}(\tilde{W}_{i,j}) = p_{i,j}M_X(s), \quad (1)$$

где $p_{i,j}$ – условная вероятность перехода i, j ; $M_X(s)$ – производящая функция моментов ветви i, j .

Операции и процедуры, выполняемые на пятом и шестом этапах моделирования, требуют большего внимания и более подробно будут описаны. А на седьмом этапе математического моделирования на основе многослойной GERT-сети, как показали исследования, удобным и эффективным способом описания процесса передачи от истока к выходному (внутреннему) узлу, является топологическое представление Мейсона [6]:

$$1 - \sum T(L_1) + \dots + (-1)^n \sum T(L_n) = 0, \quad (2)$$

где $\sum T_i$ – суммы эквивалентных коэффициентов пропуска для всех возможных петель i -го порядка.

Уравнение (2) выражает связь эквивалентной W -функции $W_E(s)$ с эквивалентными W -функциями петель первого и i -го порядков.

На восьмом этапе моделирования осуществляется вычисление эквивалентной $W_E(s)$ функции по формуле:

$$W_E(s) = \frac{\sum_{\gamma_1=1}^{\Gamma_1} \prod_{\sigma_1=1}^{\Delta_1} \hat{W}_{\gamma_1 \sigma_1}^1 + \dots - (-1)^m \sum_{\gamma_m=1}^{\Gamma_m} \prod_{\sigma_m=1}^{\Delta_m} \hat{W}_{\gamma_m \sigma_m}^m}{1 - \sum_{\alpha_1=1}^{\Lambda_1} \prod_{\beta_1=1}^{B_1} \bar{W}_{\alpha_1 \beta_1}^1 + \dots + (-1)^\ell \sum_{\alpha_\ell=1}^{\Lambda_\ell} \prod_{\beta_\ell=1}^{B_\ell} \bar{W}_{\alpha_\ell \beta_\ell}^\ell}, \quad (3)$$

где $\prod_{\sigma_i=1}^{\Delta_i} \hat{W}_{\gamma_i \sigma_i}^i$ – произведение W -функции дуг r_i -ой петли i -го порядка,

включающей в себя сток t , $1 \leq i \leq m$; $\prod_{\beta_j=1}^{B_j} \bar{W}_{\alpha_j \beta_j}^j$ – произведение

W -функции дуг α_j -ой петли j -го порядка, не включающей в себя сток t , $1 \leq j \leq \ell$.

Далее на девятом этапе при переходе от эквивалентной W -функции $W_E(s)$ GERT-сети к ее характеристической функции $X_E(\zeta)$ используется формула Меллина:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} X_E(\zeta) e^{\zeta x} d\zeta. \quad (4)$$

Характеристическая функция $X_E(\zeta)$ находится на основе топологического уравнения Мейсона путем замены в эквивалентной

производящей функции моментов $M_E(s)$ переменной s на $i\zeta$, где ζ – действительная переменная.

В [6] отмечено, что для обеспечения условий интегрирования в подынтегральное выражение уравнения (4) необходимо добавить множитель $e^{(-0,5\zeta^2)}$. С целью адекватного описания данной операции в структуре многослойной GERT-сети добавляется последовательная ветвь, описываемая нормально распределенной случайной величиной ζ^2 с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной единице. Вновь образованную ("фиктивную") ветвь можно включить сразу после источника S сети. Тогда вновь определенная характеристическая функция $\tilde{X}_E(\zeta)$ определяется как: $\tilde{X}_E(\zeta) = e^{(-0,5\zeta^2)} X_E(\zeta)$.

Переходя от эквивалентных $W_E(s)$ функций к характеристическим $X_E(\zeta)$, на основании выражения (3) можно получить следующее аналитическое выражение:

$$X_E(\zeta) = \frac{\frac{1}{P_E} \sum_{\gamma_1=1}^{\Gamma_1} \prod_{\sigma_1=1}^{\Delta_1} \hat{p}_{\gamma_1\sigma_1} \hat{X}_{\gamma_1\sigma_1}^1 + \dots - (-1)^m \sum_{\gamma_m=1}^{\Gamma_m} \prod_{\sigma_m=1}^{\Delta_m} \hat{p}_{\gamma_m\sigma_m} \hat{X}_{\gamma_m\sigma_m}^m}{1 - \sum_{\alpha_1=1}^{A_1} \prod_{\beta_1=1}^{B_1} \bar{p}_{\gamma_1\sigma_1} \bar{X}_{\alpha_1\beta_1}^1 + \dots + (-1)^\ell \sum_{\alpha_\ell=1}^{A_\ell} \prod_{\beta_m=1}^{B_\ell} \bar{p}_{\gamma_m\sigma_m} \bar{X}_{\alpha_\ell\beta_\ell}^\ell}, \quad (5)$$

где $\prod_{\sigma_1=1}^{\Delta_1} \hat{p}_{\gamma_1\sigma_1}$ и $\prod_{\beta_m=1}^{B_\ell} \bar{p}_{\gamma_m\sigma_m}$ находятся из отношений

$$\prod_{\sigma_1=1}^{\Delta_1} \hat{p}_{\gamma_1\sigma_1} = \frac{\prod_{\sigma_1=1}^{\Delta_1} \hat{W}(s)_{\gamma_1\sigma_1}^1}{\prod_{\sigma_1=1}^{\Delta_1} \hat{M}(s)_{\gamma_1\sigma_1}^1} \quad \text{и} \quad \prod_{\beta_m=1}^{B_\ell} \bar{p}_{\gamma_m\sigma_m} = \frac{\prod_{\beta_m=1}^{B_\ell} \bar{W}(s)_{\sigma_\ell\beta_\ell}^\ell}{\prod_{\beta_m=1}^{B_\ell} \bar{M}(s)_{\sigma_\ell\beta_\ell}^\ell} \quad \text{заменой } s \rightarrow i\zeta \text{ [6].}$$

Следует отметить, что все математические операции, выполняемые на этапах 9 – 11, проанализированы, описаны в работах [4 – 8], прогнозируемы и, несмотря на сложность выполнения, не требуют дополнительного исследования.

Методика эквивалентных, упрощающих преобразований GERT-сети. Одним из основных этапов математического моделирования многослойных GERT-структур является этап эквивалентного

преобразования. При этом перед разработчиками встает сложная задача: при максимальной простоте разрабатываемой математической модели добиться минимизации погрешностей получаемых результатов.

Процедура преобразования многослойной GERT-сети к эквивалентной дуге представляется набором элементарных операций преобразования, в результате которых можно получить эквивалентные характеристические функции. Представим основные упрощающие преобразования.

1. Последовательные дуги. Если последовательно соединенные дуги многослойной GERT-сети имеют W -функции W_1 и W_2 то их эквивалентная W -функция $W_{E_{1,2}}$ вычисляется с помощью выражения: $W_{E_{1,2}} = W_1 W_2$. Эквивалентная дуга $X_{E_{1,2}}$ математически может описываться характеристической функцией [6]:

$$X_{E_{1,2}} = \operatorname{Re} \chi_1 \operatorname{Re} \chi_2 - \operatorname{Im} \chi_1 \operatorname{Im} \chi_2 + i(\operatorname{Re} \chi_1 \operatorname{Im} \chi_2 + \operatorname{Im} \chi_1 \operatorname{Re} \chi_2). \quad (6)$$

2. Параллельные дуги. Для дуг многослойной GERT-сети с вероятностями выбора соответственно p_1 и p_2 эквивалентная W -функция $W_{E_{1,2}}$ вычисляется с помощью выражения: $W_{E_{1,2}} = p_1 W_1 + p_2 W_2$, а характеристическая функция $X_{E_{1,2}}$ эквивалентной дуги описывается выражением [6]:

$$X_{E_{1,2}} = p_1 \operatorname{Re} \chi_1 + p_2 \operatorname{Re} \chi_2 + i(p_1 \operatorname{Im} \chi_1 + p_2 \operatorname{Im} \chi_2). \quad (7)$$

3. Дуга и петля первого порядка, соединяющая выход и вход узла. Если $W_1 = p_1 M_1$ есть W -функция петли первого порядка, соединяющей выход и вход узла, и имеющей вероятность выбора p_1 , а $W_2 = p_2 M_2$ является W -функцией дуги, выходящей из узла, и имеющей вероятность выбора p_2 , то эквивалентная W -функция этого фрагмента $W_{E_{1,2}}$

вычисляется с помощью выражения: $W_{E_{1,2}} = \frac{W_2}{1 - W_1}$, а вероятность $p_{E_{1,2}}$

перехода (дуги) $W_{E_{1,2}}$ равна: $p_{E_{1,2}} = \frac{p_2}{1 - p_1}$, при условии что $p_1 + p_2 \neq 1$.

Эквивалентная дуга $X_{E_{1,2}}$ описывается характеристической функцией [6]:

$$X_{E_{1,2}} = \frac{p_2(\operatorname{Re} \chi_2 - p_1 \operatorname{Re} \chi_1 \operatorname{Re} \chi_2 - p_1 \operatorname{Im} \chi_1 \operatorname{Im} \chi_2)}{(1 - p_1 \operatorname{Re} \chi_1)^2 + p_1^2 (\operatorname{Re} \chi_1)^2} + \quad (8)$$

$$+ \frac{ip_2(\operatorname{Im} \chi_2(1 - p_1 \operatorname{Re} \chi_1) + p_1 \operatorname{Im} \chi_1 \operatorname{Im} \chi_2)}{(1 - p_1 \operatorname{Re} \chi_1)^2 + p_1^2 (\operatorname{Im} \chi_1)^2}.$$

Для эквивалентных преобразований многослойной GERT-сети и приведения ее к единственной эквивалентной дуге воспользуемся следующим алгоритмом.

Входными данными приведенного алгоритма является структура сформированной многослойной GERT-сети в составе: множества узлов сети – $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{k-1}, v_k, v_{k+1}, \dots, v_h\}$, множества дуг одного уровня сети – $D = \{d_{1,1}, d_{1,2}, \dots, d_{k-1,k}, d_{k,k}, d_{k,k+1}, \dots, d_{h-1,h}, d_{h,h}\}$, множества межуровневых дуг – $Dm = \{dm_{i,j}\}$.

На первом шаге алгоритма необходимо провести выделение межуровневых дуг $dm_{i,j}$ в качестве границ внутренних подсетей, требующих первоначального эквивалентного преобразования.

В случае успешного прохождения первого шага, далее, на втором шаге алгоритма, производится исключение петель первого рода путем пересчета характеристических функций дуг $d_{k,k+1}, \dots, d_{k,h}$, выходящих из некоторого узла v_k , по формуле (8).

Следует заметить, что введение в начальные входные данные и условия многоуровневости моделируемой структуры заставляют в цикле осуществлять проверку факта формирования упрощенной многослойной GERT-сети. В случае положительного ответа на этот вопрос в соответствии с алгоритмом выполняется шестой шаг – замена сформированных межуровневых дуг на эквивалентные, с пересчетом характеристических функций. На третьем шаге алгоритма производится дублирование узлов, имеющих две или более выходных дуги, с копированием существующих в GERT-сети или определенных после первого шага входных дуг. На четвертом шаге производится замена последовательных дуг на эквивалентные с исключением определенного ранее, внутреннего (v_k) узла эквивалентной дуги.

Выполнение первых четырех шагов алгоритма эквивалентного преобразования GERT-сети может привести к упорядочению и образованию совокупности последовательных и параллельных дуг, которые на пятом шаге алгоритма могут быть заменены на эквивалентные с пересчетом характеристических функций с помощью выражений (6) (7). В результате пошагового выполнения алгоритма должна сформироваться упрощенная

GERT-сеть, состоящая из двух узлов и одной эквивалентной дуги. Сложность предложенного алгоритма приблизительно составляет $O(n)^4$.

Выводы. Таким образом, разработана методика математического моделирования защищенной ИТС на основе многослойной GERT-сети, которая отличается от известных учетом многоуровневости существующих информационно-телекоммуникационных сетей.

Список литературы: 1. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишнеvский. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с. 2. Кузнецов О.О. Протоколы захисту інформації у комп'ютерних системах та мережах: Навч. посібник / О.О. Кузнецов, С.Г. Семенов. – Харків: ХНУРЕ, 2009. – 186 с. 3. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. – М.: Мир, 1981. – 321 с. 4. Семенов С.Г. Математическая модель мультисервисного канала связи на основе экспоненциальной GERT-сети / С.Г. Семенов, Е.В. Мелешко, Я.В. Илюшко // "Системе озброння і військова техніка. – Х.: ХУ ПС. – 2011. – Вип. 3 (27). – С. 64-67. 5. Семенов С.Г. Моделирование защищенного канала связи с использованием экспоненциальной GERT-сети / С.Г. Семенов, А.А. Можжаев // Информатика, математическое моделирование, экономика: Сб. научных статей. – Смоленск.: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ "Российский университет кооперации". – Том. 1. – С. 152-160. 6. Шибанов А.П. Обобщенные GERT-сети для моделирования протоколов, алгоритмов и программ телекоммуникационных систем: дис. ... доктора техн. наук: 05.13.13 / Шибанов Александр Петрович. – Рязань, 2003. – 307 с. 7. Pritsker A. A. B. Modeling and analysis using Q-GERT networks New York: Wiley: Distributed by Halsted Press, 1979. – 435 p. 8. Pritsker A.A.B., Happ W.W. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part I. Fundamentals // The Journal of Industrial Engineering (May 1966). – P. 67-101.

Статью представил д.т.н., профессор НТУ "ХПИ" Обод И.И.

УДК 651.326

Методика математичного моделювання захищеної ИТС на основі багатосарової GERT-мережі / Семенов С.Г. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 185 – 193.

На основі теоретико-графового підходу моделювання розроблена методика математичного моделювання захищеної інформаційно-телекомунікаційної системи у вигляді багатосарової GERT-мережі. Визначені найбільш складні з обчислювальної точки зору етапи моделювання. Розроблений алгоритм еквівалентних, спрощуючих перетворень GERT-мережі. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: математична модель, GERT-мережа, захищена ИТС.

UDC 651.326

Methodology of mathematical design protected ITS, but to basis of multi-layered GERT-network / Semenov S.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 185 – 193.

On the basis of count approach design methodology of mathematical design the protected informatively-telecommunication system is worked out, as the multi-layered GERT-network. The most difficult from the calculable point of view stages of design are certain. The algorithm of equivalent, simplifying transformations of GERT-network is worked out. Refs.: 8 titles.

Keywords: mathematical model, GERT- network, protected ITS.

Поступила в редакцию 09.09.2012

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

В.П. СТАРЕНЬКИЙ, д-р мед. наук, с.н.с., ДУ "Інститут медичної радіології ім. С.П. Григор'єва НАМН України", Харків,
Л.О. АВЕР'ЯНОВА, канд. техн. наук, доц., ХНУРЕ, Харків,
Л.Л. ВАСИЛЬЄВ, лікар-радіолог ДУ "Інститут медичної радіології ім. С.П. Григор'єва НАМН України", Харків

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОНТУРНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ТОМОГРАМ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ТОПОМЕТРИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ КОНФОРМНОЇ ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРАПІЇ

Проаналізовані питання удосконалення комп'ютерного планування дистанційної променевої терапії на етапі визначення контурів пухлини. Проведено аналіз можливостей методів контурної сегментації томограм головного мозку щодо автоматизованого визначення меж пухлинного осередку. Наведені результати експерименту з контурної сегментації томограм, які дозволяють зменшити суб'єктивну похибку радіолога-топометриста при пошуку меж пухлини. Іл.: 4. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: дистанційна променева терапія, топометрична підготовка, пухлина, томограма, контурна сегментація.

Постановка проблеми. Актуальною проблемою сучасної медицини є підвищення ефективності лікування онкологічних захворювань шляхом створення нових методів та прецизійних технологій дистанційної променевої терапії (ДПТ). Нині основними напрямками технічного удосконалення променевої терапії є впровадження сучасних апаратних засобів лікування (медичні прискорювачі) у комплексі з новітнім програмним забезпеченням для адаптивного керування процесом опромінення. Застосування сучасних комп'ютерних технологій дозволяє удосконалити всі етапи ДПТ: обробку клінічних, топометричних та дозиметричних даних, створення оптимального плану променевого лікування, управління радіотерапевтичними апаратами під час процедури.

Топометрична підготовка є найбільш важливим етапом планування ДПТ, який, врешті решт, обумовлює загальну результативність променевого лікування. Суть топометричної підготовки ДПТ полягає у якомога правильній ідентифікації та позначенні меж пухлинного осередку на променевих діагностичних зображеннях певної модальності. Завданням лікаря-топометриста є визначення макроскопічного об'єму пухлини (GTV), на основі якого встановлюються об'єми мішені для ДПТ: клінічний об'єм (CTV); об'єм, що планується (PTV); об'єм, що підлягає лікуванню (*treated volume*) та опроміненню (*irradiated volume*) (рис.1). Визначаються також межі органів, критичних до опромінення [1]. Нині

всі ці операції технологічно здійснюються шляхом комп'ютерного аналізу томографічних зображень, на кожному з яких має бути позначений контур пухлини. Далі комп'ютерна система планування ДПТ буде об'ємні моделі тіла пацієнта, пухлини та критичних органів (рис. 2).

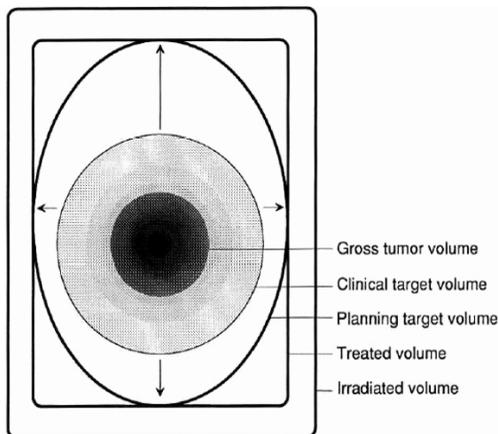


Рис. 1. Співвідношення об'ємів пухлини та мішені для опромінення

Задача точного визначення меж пухлин наразі є неоднозначною насамперед через різноманіття варіантів патологічних ушкоджень тканин та особливості їх візуалізації у різних модальностях [2]. Також має значення досвід та інтуїція спеціаліста, який проводить аналіз зображення. Він може мати навички більш у діагностичній або лікувальній діяльності. Отже, для вирішення поставленої задачі мають бути розроблені нові методики аналізу діагностичних зображень [3], які, у тому числі, зменшать вплив суб'єктивних елементів цього процесу.

Аналіз літератури. Визначення контуру пухлини – досить складна обчислювальна задача, яка дозволяє запобігти суб'єктивним помилкам при розрахунку GTV. Нині широко застосовуються засоби програмного аналізу томографічних зображень у заданому діапазоні чисел Гаунсфілда з використанням сегментації та морфологічних перетворень, метою яких є автоматична побудова контуру GTV [2, 4]. З клінічних міркувань цей контур може бути скоригований за допомогою інтерактивних інструментів графічного редагування. У сучасних системах планування удосконалено процес оконтурювання анатомічних структур за рахунок автоматичного суміщення томограм різної модальності з подальшою

обробкою поєднаного зображення. Інша технологія, направлена на підвищення точності оконтурювання структур – автосегментація, яка базується на застосуванні зображень анатомічних атласів. Наперед визначені за атласом обриси органів програмно адаптуються до обрисів органів конкретного пацієнта [5].

Незважаючи на всі ці можливості, топометристи припускаються значних (аж до 5 см) відхилень навіть при оконтурюванні нормальних анатомічних структур [6]. За такої ситуації існує вірогідність суттєвої помилки при визначенні GTV та меж критичних органів, що може призвести до вкрай негативних наслідків променевого лікування. Отже, при плануванні ДПТ задача правильного визначення меж анатомічних структур на томограмах набуває особливої ваги.

Мета статті – аналіз можливостей застосування методів контурної сегментації томограм при ідентифікації пухлин головного мозку з метою уникнення суб'єктивних похибок радіолога-топометриста.

Матеріали дослідження. В роботі аналізувались напівтонові томограми голови у двох модальностях (ікс-променева комп'ютерна томограма КТ – рис. 2, а та магніторезонансна томограма МРТ – рис. 2, б), на яких виявлені ознаки пухлини.

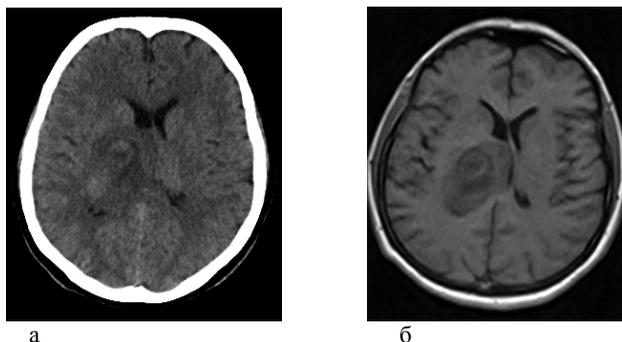


Рис. 2. Томограми голови (астроцитома головного мозку): а – КТ; б – МРТ

Контури пухлини на цих зображеннях були визначені за допомогою програмного засобу – віртуального симулятора системи планування радіотерапевтичного комплексу Varian. Контур пухлини був позначений в результаті візуального аналізу зображень.

Авторами був проведений комп'ютерний експеримент з автоматичного оконтурювання пухлини (рис. 2) за допомогою пакету IPT Matlab. Застосовані градієнтні методи контурної сегментації – Собеля,

Прюїтт, Робертса та Кенні [7, 8]. Результат обробки зображень модальностей КТ та МРТ наведений на рис. 3, де для кожного методу вказані значення порогу *thresh*, при якому визначено найбільше елементів контуру пухлини. Порівняльний аналіз результатів контурної сегментації зображень свідчить про наступне.

1. За рахунок кращого тканинного контрасту "пухлина-мозок" на МРТ-зрізі всі методи пошуку меж дали кращі результати, ніж для КТ-зрізу, на якому елементи контуру пухлини неможливо з'єднати через значну зашумленість самих КТ-зображень. Отже, результат визначення контурів насамперед залежить від модальності томографічного зображення та методів його реконструкції.

2. При побудові меж пухлини на МРТ-зрізі найкращим є метод Кенні, який є результативним в широкому діапазоні обраних порогів виділення межі, у той же час результати інших методів були вкрай критичні до найменшої зміни порогу.

3. Для правильного виділення меж пухлини виявилось недостатньо тільки КТ-зрізу, в даному випадку саме МРТ-зображення стало визначальним при пошуку контурів пухлини. Найкращим є результат обробки сумішеного зображення КТ + МРТ.

4. Порівняння контуру пухлини і отриманого в результаті обробки цього ж зображення методом Кенні (рис. 3) показують, що площа пухлини насправді виявилася більшою (рис. 4).

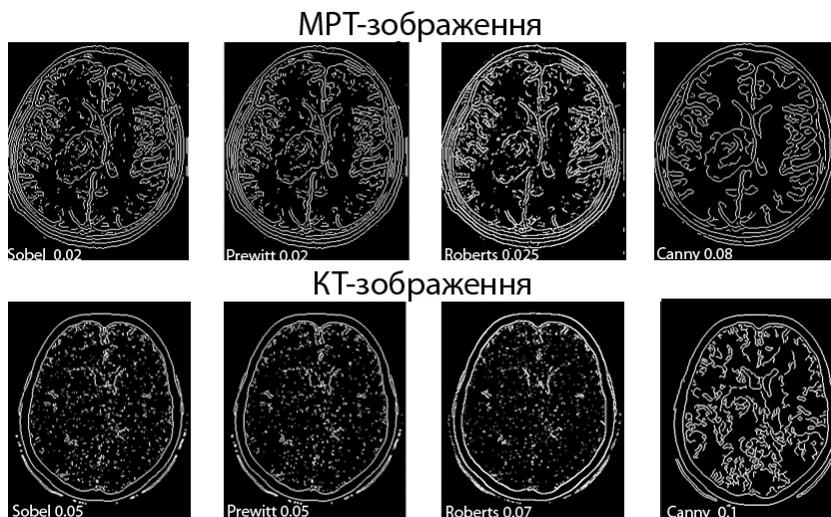


Рис. 3. Результат визначення контурів структур мозку на томограмах



Рис. 4. Контур пухлини, визначений за методом Кенні, та результат його суміщення з контуром, позначеним вручну

Висновки. Проведено аналіз можливостей застосування градієнтних методів контурної сегментації щодо аналізу томограм головного мозку (КТ, МРТ) з ознаками пухлинного осередку. Серед досліджених методів пошуку меж пухлини стабільно прийнятний результат для томограм обох модальностей дав метод Кенні. Застосування цього методу дозволить об'єктивізувати процес топометричної підготовки ДПТ і забезпечити найбільш точну відповідність форми мішені та поля опромінення.

Список літератури: 1. International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy (ICRU Report 50). – Bethesda, MD, International Commission on Radiation Units and Measurements, 1993. 2. *Newbold K.* Advanced imaging applied to radiotherapy planning in head and neck cancer: a clinical review / *K. Newbold, M. Partridge, G. Cook, S.A. Sohaib, E. Charles-Edwards, P. Rhys-Evans, K. Harrington, C. Nutting.* – 2006. – 79. – С. 554–561. 3. *Розенфельд Л.Г.* Возможности постобработки диагностических КТ и МРТ-изображений на персональном компьютере. – Український медичний часопис. – 2006. – № 6 (56) – XI/XII. – С. 69-72. 4. *Гонсалес, Р.* Цифровая обработка изображений / *Р. Гонсалес, Р. Вудс.* – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. 5. *Старенький В.П.* Аналіз інформаційних і технічних можливостей сучасних систем планування дистанційної радіотерапії / *В.П. Старенький, Л.О. Авер'янова, Л.Л. Васильєв, Ю.О. Орлова* // Наук.-метод. журнал "Клінінформат. і телемед." – 2011. – Т. 7. – Вип. 8. – С. 79-82. 6. *Dawn C. Collier.* Assessment of consistency in contouring of normal-tissue anatomic structures // *J. App. Clin. Med. Phys.* – 2003. – № 4. – Р. 17-24. 7. *Березький О.М.* Алгоритм проходження контуром об'єкта з використанням зворотного ходу / *О.М. Березький, Ю.М. Батько* // "Искусственный интеллект" – 2009. – № 3. – С. 516-522. 8. *Абакумов В.Г.* Базовые методы обработки биомедицинских изображений / *В.Г. Абакумов, С.Г. Антощук, В.Н. Крылов* // *Электроника и связь. Тем. вып. "Проблемы электроники".* – Ч. 2. – 2008. – С. 53-56.

Статью представил д.ф.-м.н., проф. ХНУРЕ Бих А.І.

УДК 616-073

Применение методов контурной сегментации томограмм для усовершенствования топометрической подготовки конформной лучевой терапии / Старенький В.П., Аверьянова Л.А., Васильев Л.Л. // *Вестник НТУ "ХПИ".* Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 62 (968). – С. 194 – 199.

Проанализированы вопросы совершенствования компьютерного планирования дистанционной лучевой терапии на этапе определения контуров опухоли. Проведен анализ возможностей методов контурной сегментации томограмм головного мозга для

ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ", 2012, № 62 (968)

автоматизированного определения границ опухолевого очага. Приведены результаты эксперимента по контурной сегментации томограмм, которые позволяют уменьшить субъективную ошибку радиолога-топометриста при поиске границ опухоли. Ил.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: дистанционная лучевая терапия, топометрическая подготовка, опухоль, томограмма, контурная сегментация.

UDC 616-073

Application of the methods of tomograms contour segmentation for improvement of conformal radiotherapy topometric preparation / Starenkiy V.P., Averyanova L.O., Vasyliiev L.L. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 194 – 199.

The issues of improvement of computed radiotherapy treatment planning at the stage of tumor boundary detection are analyzed. The analysis of the possibilities of the brain tomograms contour segmentation methods for the automated tumor boundary delineation is carried. The results of experiment on the contour segmentation of tomograms which allow reduce the subjective error of radiologist- topometrist in tumor boundaries finding are given. Figs.: 4. Refs.: 8 titles.

Keywords: radiotherapy treatment planning, topometric preparation, tumor volume, tomogram, contour segmentation.

Поступила в редакцию 13.07.2012

Содержание

<i>Бірюков Д.С., Заславський В.А., Сідляренко А.І.</i> Критична інфраструктура в умовах надзвичайних ситуацій: на прикладі мережі автомобільних доріг	3
<i>Верлань А.Ф., Худаяров Б.А., Файзибоев Э.Ф., Юлдашев З.У.</i> Компьютерное моделирование флаттера вязкоупругих ортотропных пластин в сверхзвуковом потоке газа	8
<i>Волченко Е.В.</i> Классификация объектов в адаптивных системах распознавания на основе функции взвешенного конкурентного сходства	18
<i>Гамзаев Х.М.</i> Численное моделирование упруговодонапорного режима пласта	26
<i>Головко Н.А., Логунова О.С.</i> Оценка архитектуры искусственных нейронных сетей для моделирования процесса нагрева стальной полосы на агрегате непрерывного горячего цинкования	33
<i>Горбатова Е.А., Зарецкий М.В., Дюскина А.И.</i> Экспертная система в проектировании технологических процессов в гидрометаллургии	40
<i>Гришин И.Ю.</i> Основанный на принципе максимума метод решения задачи нелинейного бинарного программирования	46
<i>Дмитриенко В.Д., Заковортный А.Ю.</i> Дискретные нейронные сети АРТ, использующие идеи иммунокомпьютинга	52
<i>Дудко І.О., Бахрушин В.Є.</i> Використання методу k -середніх для ідентифікації моделей неоднорідних розподілів випадкових величин	64
<i>Ельчанинов Д.Б., Байда К.Е.</i> Вербальный анализ моделей бизнес-процессов	70
<i>Заневский И.Ф.</i> Компьютерная модель системы стрелок-лук	76

Иванов В.Г., Ломоносов Ю.В., Любарский М.Г. Классификация символов в алгоритмах сжатия изображения текста и системы оптического распознавания	83
Кожухар О.Т., Барило Г.И., Ивах М.С., Кус Н.И. Система підтримки прийняття рішення при фотоферезі	91
Козленко М.И. Оптимальный объем статистической выборки для цифровой демодуляции широкополосных сигналов с керованою ентропією в комп'ютерних системах	96
Кондратенко Ю.П., Коробко О.В., Свіридов А.І. Фільтрація завад та аналіз характеристик фільтрів на основі адаптивних алгоритмів та нейронної мережі ADALINE	101
Красношлык Н.А., Богатырёв А.О. Численное исследование диффузионной конкуренции фаз на основе квазидвумерной модели	113
Логунова О.С., Филиппов Е.Г., Павлов В.В., Павлов И.В. Постановка взаимосвязанных задач многокритериальной оптимизации состава шихты для дуговых электросталеплавильных печей	121
Ляховец А.В. Исследование зависимости значения k при построении k - nn графа от различных характеристик выборки для модификации алгоритма Хамелеон	130
Мацко И.И., Логунова О.С., Павлов В.В., Мацко О.С. Адаптивное нечеткое дерево принятия решений с динамической структурой для автоматизированной системы управления производством непрерывнолитой заготовки	135
Носков В.И. Тепловая модель тягового двигателя тепловоза	142
Оробинская Е.А., Король О.И., Шаронова Н.В. Языковая компетенция информационных систем	148
Павленко С.В., Павленко В.Д., Положаенко С.А. Методы идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра с помощью тестовых полиимпульсных воздействий	155

Поворознюк Н.І., Бобрівник К.Е. Вимірювання параметрів і обробка інформації в інтелектуальній системі електроживлення (Smart Grid)	162
Ризун Н.О. Тестируемый как подсистема замкнутого контура регулирования	169
Селиванов А. Компьютерно-управляемая система дискретного стробоскопического преобразователя сигналов	177
Семенов С.Г. Методика математического моделирования защищенной ИТС на основе многослойной GERT-сети	185
Старенький В.П., Авер'янова Л.О., Васильєв Л.Л. Застосування методів контурної сегментації томограм для удосконалення топометричної підготовки конформної променевої терапії	194

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика і моделювання
№ 62 (968)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор к.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. № 175 – 12

Підп. до друку 13.12.2012 р. Формат 60x84 1/16. Папір Copy Paper.
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.

Отпечатано в типографії ООО "Цифра Принт"
на цифровом комплексі Xerox DocuTech 6135
Свидетельство о Государственной регистрации
А01 № 432705 от 03.08.2009 г.
Адрес: г. Харьков, ул. Культуры, 22-Б