

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

BІЧНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 21 (1193) 2016

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2016

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – 195 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

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

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, 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.; 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.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

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

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

Члени редколегії: А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Є.Г. Жиляков, д-р техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.; В.І. Носков, д-р техн. наук, проф.; А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.; Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан); О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.; А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Белорусь); Ханлар Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан); Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан); Ihor Zanevsky, PhD, prof. (Polska).

Рекомендовано до друку Вченого радио НТУ "ХПІ"

Протокол № 5 від 27.05 2016 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

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

в міжнародних наукометрических базах, репозитаріях та пошукових системах

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

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

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

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Россия), Bielefeld Academic Search Engine (Германия), Open Journal Systems (Україна), Национальная библиотека им. Вернадского (Україна), Научно-техническая библиотека НТУ "ХПІ" (Україна), Text Archive (Россия).

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

6. University Libraries: ***США:*** Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library.

Великобританія: Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPrimo Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. ***Канада:*** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. ***Австралія:*** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. ***Швеція:*** IBRIS - Nationally bibliotheca system, Högskolan Dalarna, Södertörns högskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. ***Нідерланди:*** Quality Open Access Market, University of Leiden. ***Мексика:*** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. ***Інші країни:*** Universia (Іспанія), Babord+ (Франція), SLU (Швеція), Cerge EL (Чехія), BON (Португалія), AUT Library (Нова Зеландія), Polska Bibliografia Naukowa (Польща), Государственная національна техніческая библиотека (Україна), Наукная библиотека имени Говорова (Россія, Санкт-Петербург), Universiteits bibliotheek Gent (Бельгія), E-Resources Subject Access (Китай).

Електронна адреса сайту Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" www.pim.net.ua

З.Ю. ГОТРА, д-р техн. наук, проф., НУ"ЛП", Львів,
О.Т. КОЖУХАР, д-р техн. наук, проф., НУ"ЛП", Львів,
Г.Л. КУЧМІЙ, канд. техн. наук, доц., НУ"ЛП", Львів,
I.П. КРЕМЕР, канд. техн. наук, ас., НУ"ЛП", Львів,
Л. РАДЗІШЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., ТНУ,
Свентокриштський Кельце, Польща

СИСТЕМА НЕПЕРЕРВНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ МІЖ ПК ТА ПЕРИФЕРІЙНИМ ОПТИКОЕЛЕКТРОННИМ ПРИСТРОЄМ

На основі аналізу засобів обміну інформацією периферійних пристройів з ПК щодо застосування в неінвазивних діагностично-лікувальних методах і експериментальних дослідженнях запропоновано для покращення інформаційного забезпечення лікаря, що працює в інтерактивному режимі неінвазивного тестування пацієнта впродовж лікувальної процедури, функціональну схему багатоканального інтерфейсного перетворювача зв'язку системи неперервного обміну інформацією між оптикоелектронними медичними периферійними пристроями та персональним комп'ютером. Іл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: неінвазивний, система неперервного інформаційного обміну, медичний периферійний пристрій, оптикоелектронний пристрій.

Постановка проблеми. Недостатнє забезпечення розробленнями систем неперервного обміну інформацією периферійних пристройів з ПК, а, у більшості, відсутність у медичній практиці саме таких систем неінвазивної дії на оптикоелектронному принципі, не дають можливості застосування перспективних медичних технологій і впровадження в них методів оперативного прийняття об'єктивного лікарського рішення. Впровадження такої системи дозволило б підвищити інформативність даних про перебіг і наслідки для пацієнта конкретної лікувальної процедури та лікування в цілому. Створення такої системи на основі неперервного тестування пацієнта впродовж процедури дало б можливість прискорення, автоматизації та об'єктивності прийняття лікарського рішення та покращення роботи лікаря в інтерактивному форматі.

Аналіз літератури. Проведено аналіз основних систем обміну інформації периферійних пристройів з ПК. Для забезпечення обміну інформації між зазначеними пристроями використовують системи передавання даних, які визначають способи, протоколи та узгоджують роботу пристройів [1 – 4]. Було розглянуто LPT, COM, USB, SATA, I2C, UART інтерфейси обміну даними та зроблено висновок, що для обміну інформацією між медичними периферійними пристроями (МПП) та ПК

© З.Ю. Готра, О.Т. Кожухар, Г.Л. Кучмій, І.П. Кремер, Л. Радзішевський,
2016

популярним є застосування USB шини, яка є типовою для сучасних ПК і забезпечує достатню швидкість інформаційного обміну [5 – 7], а для вирішення задачі його неперервності при тестуванні пацієнта впродовж лікувальної процедури із застосуванням МПП, зокрема на оптоелектронному принципі [8], доцільно проводити комп’ютерне моделювання та використовувати спеціалізовані компоненти із вбудованими інтерфейсами зв’язку [9]. Оскільки більшість мікроконтролерів не мають можливості здійснювати обмін з ПК за допомогою інтерфейсу USB чи RS-232 виникає потреба використання спеціалізованих мікросхем погодження рівнів між пристроєм та ПК [10].

Мета статті – створення системи неперервного обміну інформації між МПП і ПК для забезпечення його неперервності при неінвазивному тестуванні пацієнта на оптоелектронному принципі впродовж лікувальної процедури.

Розроблення схеми. Згідно запропонованої функціональної схеми (рис.1) вхідні сигнали через узгоджувальний дільник поступають на мультиплексор, який здійснює почергове перемикання аналогових портів мікроконтролера відповідно до вхідної напруги.

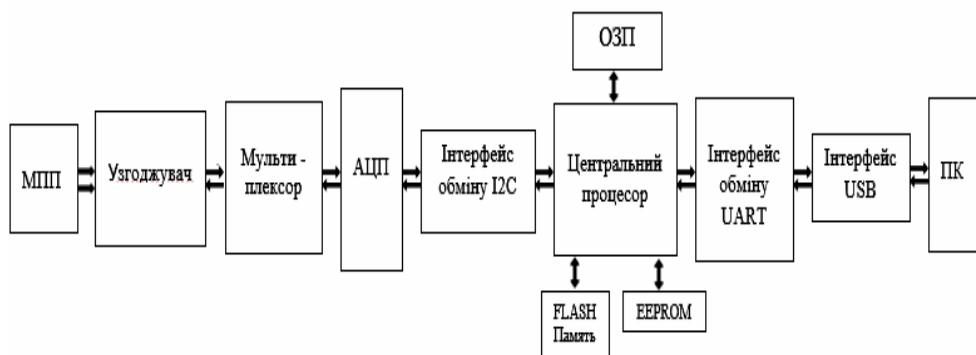


Рис. 1. Функціональна схема спряження

Усі логічні функції мікроконтролера здійснюються за допомогою арифметико логічного пристроя, розташованого в області центрального процесора. Для скорочення часу на проектування схеми спряження використовували схемний редактор Proteus VSM (LABCENTER Electronics) на основі ядра Spice Proteus. На рис. 2 зображено робоче поле редактора ISIS у процесі проектування блоку спряження. З метою запобігання виходу з ладу мікроконтролера внаслідок подавання на вхід дільника напруги, що перевищує норму (0 – 5 В), використано стабілітрон номіналом 2,5 В. При подаванні вхідного сигналу з

амплітудою 5 В на блок дільника вхідні резистори забезпечують необхідний вихідний рівень напруги, який коливається від 0 до 2,5 В.

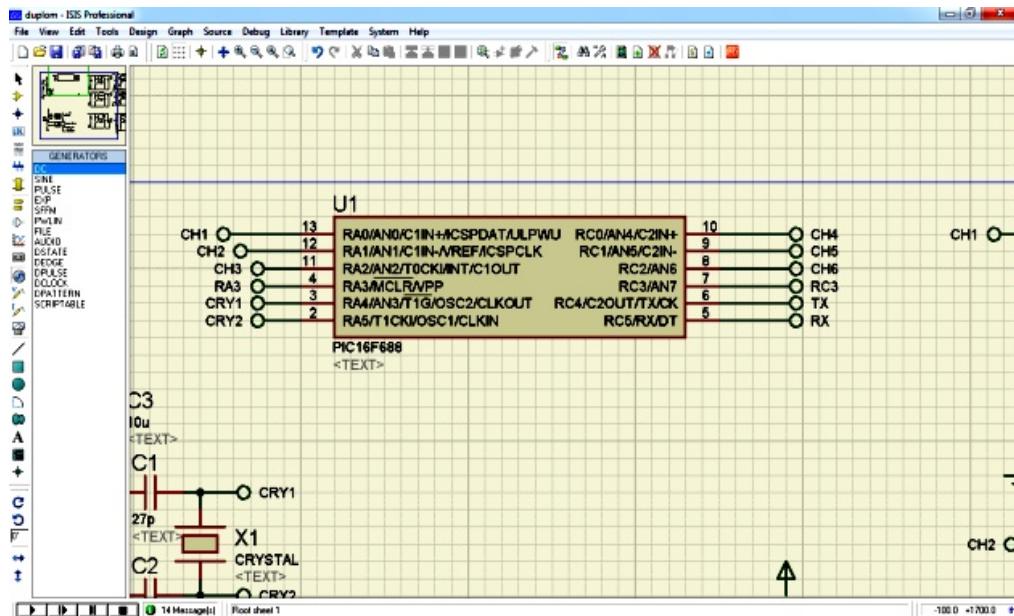


Рис. 2. Робоче поле редактора ISIS у процесі розроблення

Моделювання схеми проводилося з використанням віртуального терміналу обміну даними для симуляції передавання інформації між ПК та мікроконтролером, та віртуальним осцилографом.

Моделювання полягало у відправленні на мікроконтролер за допомогою терміналу сигналів різних значень. Швидкість передавання між ПК та мікроконтролером складала 9600 бод. У відповідь на отриманий запит макроконтролер відправляє чотири байта інформації в яких вказано: номер каналу АЦП, молодший байт інформації, старший байт інформації, та контрольна suma у вигляді попередніх байтів передавання. Отримані результати згідно осцилограм свідчать, що мікроконтролер та ПК працюють коректно та готові обмінюватися інформацією.

Запропонована схема спряження складається з шести вузлів, які звязані між собою термінальним типом зв'язку (рис. 3). Схема містить гальванічну оптоволоконну розвязку UART інтерфейсу, яка забезпечує захист ПК від високої напруги на вході або виході з ладу вхідного вузла пристрою.

Оригінальністю розроблення є застосування мікросхеми PL, яка забезпечує реалізацію USB інтерфейсу та використання пристрою в сучасних ПК. На рис. 3 зображене високо інтегрований перехідник USB-

UART, для створення якого використовують мінімальну кількість зовнішніх компонентів, організовуючи послідовний обмін даними між мікроконтролером та ПК шиною USB. Особливість полягає також у енергонезалежній EEPROM пам'яті. Мікросхема PL2303R містить у собі інтерфейс UART, швидкість передавання для якого сягає від 300 бод до 3 Мбод для RS422/RS485/TTL та від 300 бод до 1 Мбод для RS-232.

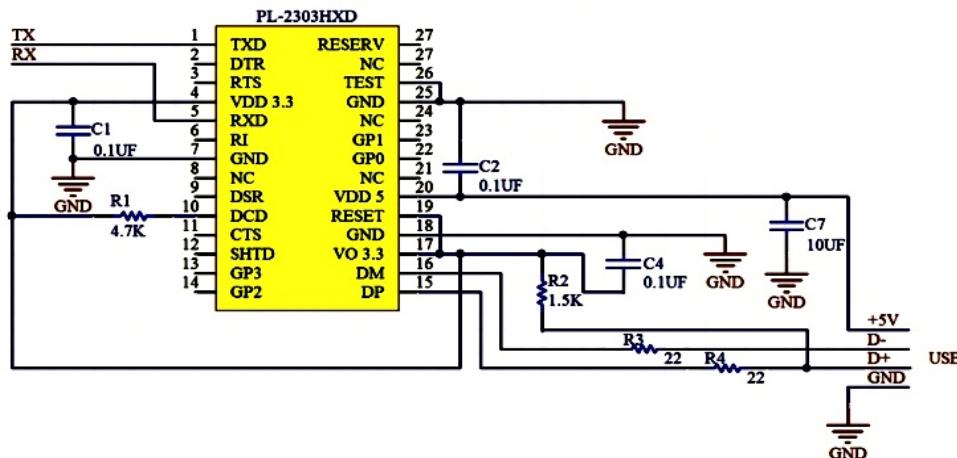


Рис. 3. Схема спряження ПК та мікроконтролера

VCP (віртуальний COM-порт) і D2XX (DLL) драйвера для розробників, забезпечують вбудованим унікальним ідентифікаційним номером (prolific-IDTM), що може бути використаним для створення ключа захисту. Проектування друкованої плати здійснювалося з використанням пакету програм ProteusARES. За результатами моделювання схеми спряження отримано текст програми мікроконтролера у hex форматі. Для програмування мікроконтролера використано програматор PICkit 2.

Висновки. Запропоновано концепцію автоматизованого оцінювання результатів неінвазивного тестування пацієнта неперервно впродовж лікувальної процедури на грунті вдосконалення системи неперервного обміну інформацією між оптоелектронними медичними периферійними пристроями та персональним комп’ютером.

На основі розробленої моделі запропоновано структуру та функціональну схему багатоканального інтерфейсного перетворювача зв’язку системи.

За результатами експериментальних досліджень розроблено принципову схему та високотехнологічну друковану плату перетворювача зв’язку, що покладено в основу розвитку систем неперервного обміну

інформацією, які дозволять значно скоротити час оцінювання, підвищити рівень його об'єктивності та автоматизувати прийняття лікарського рішення в різноманітних оптикоелектронних медичних технологіях.

Список літератури: 1. Measurement of the magnitude and axis of corneal polarization with scanning laser polarimetry / R.N. Weinreb, C. Bowd, D.S. Greenfield, L.M. Zangwill // Arch. Ophthalmol. – 2002. – Vol. 120. – P. 901-906. 2. Dougherty G. Digital Image Processing for Medical Applications / Geoff Dougherty // California State University, Channel Islands. – 2009. – 462 p. 3. Кожем'яко В.П. Оптико-електронні методи і засоби для обробки та аналізу біомедичних зображень / В.П. Кожем'яко, С.В. Павлов, К.І. Станчук // Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 203 с. 4. Інформаційна оптико-електронна технологія аналізу реологічних властивостей крові / С.В. Павлов, А.М. Коробов, Д.В. Вовкотруб // Тези доповідей V Міжнародної Антарктичної конференції "Антарктика і глобальні системи Землі: нові виклики та перспективи". – 2011. – К.: КПІ, 2011. – С. 156. 5. Методы комп'ютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Соїфера. – М.: Фізмаліт, 2003. – 784 с. 6. Білинський Й.Й. Методи дослідження ротової рідини людини / Й.Й. Білинський, О.А. Павлюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 3. – С. 92-96. 7. Kekez M. Modelling of pressure in the injection pipe of a diesel engine by computation al intelligence / M. Kekez, L. Radziszewski // Proceedings of the Instituti on of Mechanical Engineers, PartD: Journal of Automobile Engineering 0954407011411388, first published on August 22, 2011 as doi:10.1177/0954407011411388. – Vol. 225. – P. 1660-1670. 8. Барило Г.І. Апаратурно-програмне забезпечення лікувального процесу в оториноларингології з неперервним оптико-електронним тестуванням біооб'єкта / Г.І. Барило, З.Ю. Готра, А.М. Зазуляк, О.О. Кіцера, О.Т. Кожухар, Н.І. Кус // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 2 (24). – С. 81-85. 9. Зерциков А.В. Интерфейс ATA/IDE / А.В. Зерциков – М.: БХВ-Петербург, 2009. 10. Однокристальные 8-разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры компании Microchip Tehnology [Електронний ресурс] / PIC16F7X, 2010. – 110 с. Режим доступу до матеріалу: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30325b.pdf>

References:

1. Weinreb, R.N., C., Bowd, D.S., Greenfield, L.M., Zangwill. (2002), "Measurement of the magnitude and axis of corneal polarization with scanning laser polarimetry". *Arch. Ophthalmol*, Vol. 120, pp. 901-906.
2. Dougherty, G. (2009), *Digital Image Process. for Medical Appl*, Geoff Dougherty California State University, Channel Islands, 462 p.
3. Kozhemyako, V.P., Pavlov S.V., Stanchuk K.I. (2006), *Optoelectronic methods and tools for processing and analysis of biomedical images*. UNIVERSUM-Vinnitsya, Vinnitsya, 203 p.
4. Pavlov S.V., Korobov A.M., Vovkotrub D.V. and oth. (2011), "Information Opto-Electronic Technology analyzing blood rheology". *Abstracts V International Antarctic Conference "Antarctica and global Earth system: New Challenges and Prospects – 2011"*, Kiev, Ukraine, 156 p.
5. Soyfer V.A. (2003), *Methods of computer image processing*, Fizmatlit, Moscow, 784 p.
6. Bilinskiy Y. Y., Pavlyuk O. A. (2012), "Methods of human oral fluid reseach". *Measuring and computing in technological processes*, No. 3, pp. 92-96.
7. Kekez, M., Radziszewski, L. (2011), "Modelling of pressure in the injection pipe of a diesel engine by computation al intelligence". *Proceedings of the Instituti on of Mechanical Engineers, PartD: Journal of Automobile Engineering* 0954407011411388, first published on August 22, 2011 as doi:10.1177/0954407011411388, Vol. 225, P. 1660-1670.

- 8.** Barylo G.I., Hotra Z.Yu., Zazulyak A.M., Kitsera O.O., Kozhukhar O.T., Kus N.I. (2012), "Hardware – software in otorhinolaryngology treatment process with continuous optoelectronic testing biological objects". *Opto-electronic information and energy technologies*, No. 2, P. 81-85.
- 9.** Zershchikov, A.V. (2009), *Interfeys ATA/IDE*. BHV-Peterb, St. Petersburg, 207 p.
- 10.** Single-chip 8-bit FLASH CMOS microcontrollers Microchip Technology Company (2010), available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30325b.pdf>.

Надійшла (received) 03.04.2016

Статтю представив д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ "Львівська політехніка" Микитюк З.М.

Hotra Zenon, Dr.Sci.Tech, Professor
Headof the Department of Electronic Devices
Lviv Polytechnic National University
Str. S. Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013
Tel.: (032) 258-21-57, e-mail: ep@lp.edu.ua
ORCID ID:0000-0002-6566-6706

Kozhukhar Oleksandr, Dr.Sci.Tech, Professor
Professor at the Department of Electronic Devices
Lviv Polytechnic National University
Str. S. Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013
Tel.: (032) 258-21-73, e-mail: akozhukha@ukr.net
ORCIDID: 0000-0002-7432-2526

Kuchmiy Halyna, Cand.Tech.Sci.
Senior Lecturer of the Department of Electronic Devices
Lviv Polytechnic National University
Str. S. Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013
Tel.: (032) 258-21-73, e-mail: kuchmiy@polynet.lviv.ua

Kremer Iryna, Associate Professor
Senior Lecturer of the Department of Electronic Devices
Lviv Polytechnic National University
Str. S. Bandery, 12, Lviv, Ukraine, 79013
Tel.: (032) 258-21-73, e-mail: irina_glushik@rambler.ru

Radziszewski Leszek, Dr. Sci. Tech, Professor
Department of Mechanical equipment
Technic National University,
Kelce, Poland
e-mail: lradzisz@tu.kielce.pl

УДК 651.326

Система неперервного інформаційного обміну між ПК і периферійним оптико-електронним пристроям / Готра З.Ю., Кожухар О.Т., Кучмій Г.Л., Кремер І.П., Радзішевський Л. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 4 – 10.

На основі аналізу засобів обміну інформацією периферійних пристроїв з ПК щодо застосування в неінвазивних діагностично-лікувальних методах і експериментальних дослідженнях запропоновано для покращення інформаційного забезпечення лікаря, що працює в інтерактивному режимі неінвазивного тестування пацієнта впродовж лікувальної процедури, функціональну схему багатоканального інтерфейсного перетворювача зв'язку системи неперервного обміну інформацією між оптоелектронними медичними периферійними пристроями та персональним комп'ютером. Іл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: неінвазивний, система неперервного інформаційного обміну, медичний периферійний пристрій, оптико-електронний пристрій.

УДК 651.326

Система непрерывного информационного обмена между ПК и периферийным оптико-электронным устройством / Готра З.Ю., Кожухар А.Т., Кучмий Г.Л. Кремер И.П., Радзиневский Л. // Весник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 4 – 10.

На основе анализа средств обмена информацией периферийных устройств с ПК, применяемых в неинвазивных диагностических и лечебных методах и экспериментальных исследованиях, предложено для улучшения информационного обеспечения врача, работающего в интерактивном режиме неинвазивного тестирования пациента структурную и функциональную схемы многоканального интерфейсного преобразователя связи системы непрерывного обмена информацией между оптоэлектронными медицинскими периферийными устройствами и персональным компьютером. Ил.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: неинвазивный, система непрерывного информационного обмена, медицинское периферийное устройство, оптико-электронное устройство.

UDC 651.326

The system of continuous information exchange between PCs and peripheral optical electronic device /Hotra Z., Kozhukhar O., Kuchmiy H., Kremer I., Radziszewski L. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 4 – 10.

Based on the analysis of means of information exchange peripheral devices from the PC on the use of a non-invasive diagnostic and therapeutic methods and experimental studies suggested to improve information provision doctor working interactively noninvasive testing patients for medical procedures to appropriate such regimes medicines proposed structural and functional schemes multi-transducer interface communication system of continuous exchange of information between optoelectronic medical peripherals devices and personal computer. Figs.: 3, Refs.: 10 titles.

Keywords: non-invasive, a system of continuous information exchange, peripheral medical device, optical electronic device.

А.Ф. ДАНИЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
А.Г. ДЬЯКОВ, канд. техн. наук, доц., ХГАТП, Харьков,
В.Э. ОЛЕКСЮК, магистр, НТУ "ХПИ"

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В УСТАНОВКЕ ЯМР-СПЕКТРОМЕТРА

Проведен анализ влияния параметров измерительной установки ЯМР-спектрометра на интенсивность принимаемого эхо-сигнала. Предложено устройство и обоснован метод повышения стабильности режима работы установки ЯМР-спектрометра и точности измерения параметров контролируемого вещества, путем поддержки стабильной работы высокочастотного задающего генератора, построенного на основе применения синтезатора частоты. Синтезатор частоты реализован аппаратными средствами с использованием вычислительной техники. Рассмотрена возможность реализации предложенного алгоритма на микроконтроллере. Ил. 4. Библиогр. 10 назв.

Ключевые слова: ЯМР-спектрометр, синтезатор частоты, измерение параметров, эхо-сигнал, микроконтроллер.

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время для исследования изделий и отработки технологических процессов в пищевой промышленности широко используется метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Для получения необходимых параметров путем экспериментального наблюдения за исследуемыми объектами используются спектрометры ЯМР с системами управления, построенными на основе компьютерных технологий [1 – 4]. Исследуемое вещество, помещаемое в ампулу, подвергается воздействию постоянного магнитного поля H_0 , и результирующий вектор намагниченности M устанавливается вдоль него.

После установления Больцмановского распределения населенностей уровней спиновой системы образец облучается мощным импульсом переменного электромагнитного поля H_1 , частота которого v_0 должна соответствовать ларморовской прецессии ядер (установка работает на ядрах водорода):

$$v_0 = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot H_0, \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение ядер спиновой системы вещества.

Под действием частоты v_0 в спиновой системе начинаются энергетические переходы между различными ядерными уровнями. После прекращения действия радиоимпульса, заполненного частотой v_0 , спиновая система вещества самопроизвольно начинает возвращаться к

исходному распределению. При этом в приемной катушке импульсного спектрометра ЯМР индуцируется электрический сигнал, пропорциональный ядерной намагниченности. Зарегистрировав и обработав данный сигнал можно сделать заключение о структуре и свойствах исследуемого вещества.

Образец с исследуемым веществом при проведении исследований пищевых продуктов на установке ЯМР-спектрометра находится одновременно под действием двух видов магнитного поля – постоянного и переменного [5]. Величина постоянного магнитного поля определяет частоту и интенсивность воздействия переменного магнитного поля. Это магнитное поле, создается измерительной катушкой ЯМР-спектрометра. Основными параметрами при исследовании образца являются времена спин-решеточной (T1) и спин-спиновой (T2) релаксации.

Для получения достоверных результатов, в соответствии с соотношением (1) необходимо поддерживать неизменной частоту высокочастотного генератора в процессе измерений. Во многих существующих спектрометрах используются традиционные генераторы с самовозбуждением без должной стабилизации частоты переменного магнитного поля, а для поддержания соотношения (1) регулируют величину внешнего магнитного поля. Однако при проведении исследований в результате изменения температурного режима работы генератора возможен уход частоты и нарушение условий резонанса. В настоящее время в спектрометрах ЯМР используют синтезаторы частоты, которые обеспечивают высокую точность и стабильность получаемой частоты а, при необходимости, и индикацию частоты генерации.

Существенным отличием в требованиях для синтезатора частоты спектрометра ЯМР по сравнению с традиционными широкодиапазонными синтезаторами радиоприемных устройств является то, что для данного синтезатора коэффициент перекрытия примерно равен единице. Однако дискретность изменения частоты должна быть высокой (единицы и десятки Герц). Поэтому вопросы повышения стабильности и надежности работы высокочастотного генератора для обеспечения стабильных измерений крайне актуальны в настоящее время.

Воздействие электромагнитного поля H_1 , направление которого перпендикулярно полю H_0 , приводит к тому, что вектор намагниченности вещества M начинает поворачиваться на угол θ за время t_u действия поля H_1 . Угол поворота (в радианах) определяется соотношением

$$\theta = \gamma H_1 t_u. \quad (2)$$

При определенном задании значений H_1 и t_u угол поворота θ будет точно соответствовать 90° , что и составляет основное условие обеспечения точного проведения измерений на спектрометрах ЯМР. Достоверность полученного результата в большой степени зависит от точности поворота M на угол в 90° . Однако выполнению данного условия предшествует требование обеспечения достаточно высокой однородности поля H_0 . Поэтому вопросы проверки однородности H_0 и последующего определения длительности величины зондирующего импульса t_u являются актуальными при проведении исследования веществ методами ЯМР.

Цель работы. Определение и обоснование подходов по анализу условий и выбору параметров импульсов и однородности напряженности поля при проведении исследований на установке ЯМР.

Проведенный анализ существующих схемотехнических решений синтезаторов частоты, дает обоснование на выбор структурной схемы синтезатора частоты для спектрометра ЯМР, обеспечивающего возможность подстройки параметров системы под требуемое соотношение напряженности магнитного поля и его частоты, при проведении экспериментов.

Типовая схема взаимодействия ЭВМ и синтезатора частоты приведена на рис. 1.

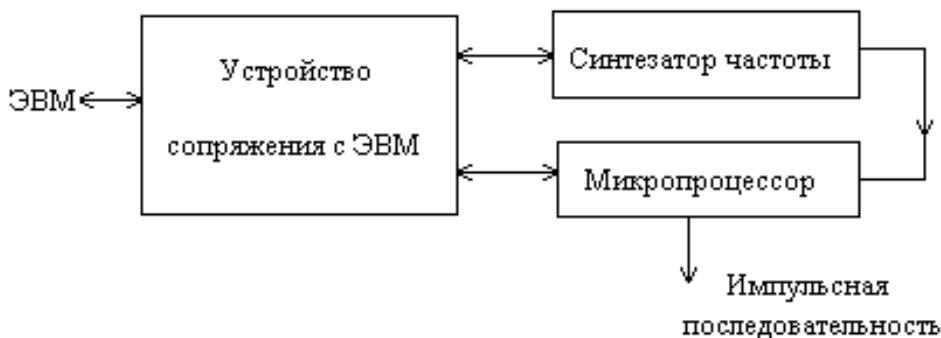


Рис. 1. Схема формирования входной импульсной последовательности спектрометра ЯМР

Особенностью синтезатора частоты для спектрометра ЯМР является малый коэффициент перекрытия частоты при обеспечении высокой дискретности изменения частоты.

Теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями установлено, что спад сигнала свободной индукции (ССИ) при высокой

однородности поля H_0 изменяется по экспоненциальному закону [6]. Это можно определить визуально в процессе анализа результатов измерений либо, записав сигнал, впоследствии проанализировать его соответствующими программными средствами. Однако, если в образце, из-за его неточной установки имеется неоднородность δH_0 , регистрируется сигнал, имеющий не экспоненциальный спад (ССИ). В этом случае необходимо изменить координаты положения образца на те, где неоднородность поля δH_0 будет незначительной. Практически это можно произвести следующим способом [7]: регистрируем ССИ, анализируем характер спада сигнала, применив соответствующие математические методы, по результатам отклонения измерений даем заключение об однородности поля.

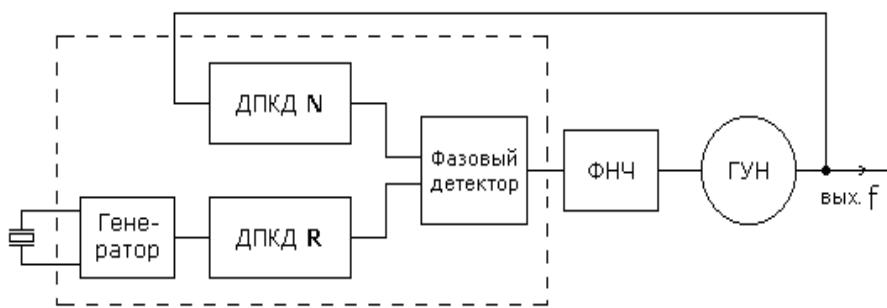


Рис. 2. Структурная схема синтезатора частоты с ФАПЧ

Изменение спада ССИ при правильной установке образцов в магнитном поле может быть представлено в виде:

$$U = U_0 \exp(\alpha t). \quad (3)$$

В случае нарушения однородности поля сигнал ССИ в первом приближении может быть представлен в виде:

$$U = U_0 \exp(\alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3), \quad (4)$$

где α, β, γ – коэффициенты, вычисляемые в ходе эксперимента.

Для определения коэффициентов аппроксимирующей кривой используются стандартные методы и функции нелинейной регрессии, имеющиеся в пакете MatchCad. Если коэффициенты β, γ – можно признать незначимыми, то однородность поля считается удовлетворительной и возможно проведение дальнейшей настройки параметров эксперимента и проведение исследований. Для проведения подобного анализа использованы стандартные методики теории планирования эксперимента [8 – 10].

На рис. 3 приведены осциллограммы ССИ в случае однородного и неоднородного поля. Применительно к приведенным сигналам были получены следующие аналитические выражения составляющих:

$$y(t) = 100 \exp(-2t) \quad \text{и} \quad z(t) = 100 \exp(-0.18t - 2t^2). \quad (5)$$

Из анализа полученных выражений следует, что кривая $z(t)$ отличается от необходимой экспоненциальной зависимости и координаты положения образца необходимо изменить.

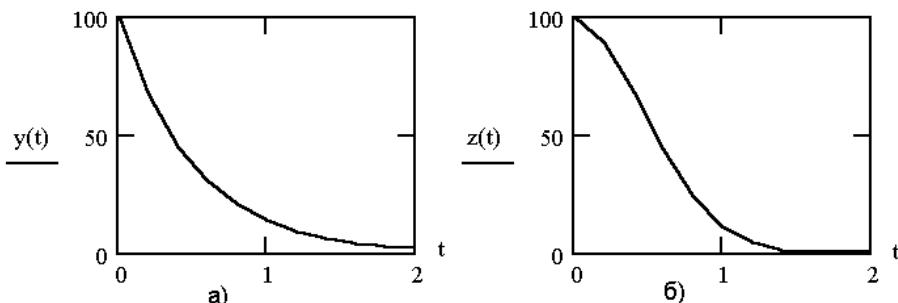


Рис. 3. Сигнал ССИ после действия 90 градусного импульса
а – однородное магнитное поле; б – неоднородное магнитное поле

Второй параметр, который должен быть точно задан при проведении исследований – это длительность первого зондирующего импульса t_u , реакция от которого должна повернуть результирующий вектор намагниченности M на угол, точно равный 90° .

В работе [6] предложена методика определения длительности импульса, предполагающая наличие синхронного детектора в измерительной системе спектрометра ЯМР, что не всегда имеет место и что в ряде случаев сильно усложняет построение канала измерения. При наличии в системе спектрометра ЯМР только амплитудного детектора невозможно воспользоваться указанной методикой.

Поэтому, предлагается следующий метод определения величины длительности сигнала первого зондирующего импульса t_u . После регистрации ССИ определяется величина

$$S(t_u)_i = \int_0^T f(t) dt, \quad (6)$$

где i – номер измерения; T – время регистрации сигнала; $f(t)$ – запись сигнала ССИ.

Экспериментально, изменения в ходе эксперимента длительность зондирующего импульса t_u , находят такое его значение, при котором будет выполняться условие:

$$\forall t_i (S(t_u^*))_i = \max S(t_i)), \quad i=1 \div n, \quad (7)$$

где n – число экспериментов. Выполнение данного условия обеспечивает поворот результирующего вектора намагниченности на угол 90° .

После нахождения наилучшего значения t_u^* необходимо уточнить длительность сигнала ССИ. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что, для получения максимального значения эхо-сигнала в измерительной катушке, второй зондирующий радиочастотный импульс должен быть расположен как можно ближе к первому с целью получения сигнала максимальной амплитуды, что обеспечивает более высокую точность измерения. Если же интервал между импульсами будет меньше T (длительность переходного процесса спада ССИ), то результат измерения амплитуды эхо-сигнала будут неверным. Поэтому минимальное расстояние между зондирующими импульсами должно немного превышать величину T . Длительность второго зондирующего импульса t_u должна быть в два раза больше первого [5], чтобы обеспечить поворот результирующего вектора намагниченности на угол 180° , что обусловлено методикой проведения исследований.

Типовое соотношение длительностей подачи зондирующих сигналов и реакция образца, в виде временной диаграммы, представлены на рис. 4.

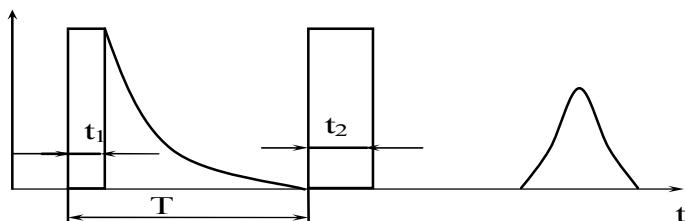


Рис. 4. Схема подачи зондирующих импульсов спектрометра ЯМР

Выводы. Предложена и обоснована методика по выбору параметров частоты заполнения зондирующих импульсов и режима измерения сигнала при проведении исследований на спектрометре ЯМР.

Показано, что компьютерные технологии дают возможности для практической реализации предложенных технических решений. Применение подобных решений позволит повысить точность и достоверность получаемых результатов исследования, проводимых с применением спектрометров ЯМР.

Дальнейшая задача, которая должна быть решена с целью повышения уровня автоматизации измерений на спектрометре ЯМР – это создание программно-аппаратных средств, позволяющих в

автоматическом режиме по определенному алгоритму изменять временные параметры между зондирующими импульсами с одновременной регистрацией амплитуды эхо-сигнала и вычислением параметров исследуемого продукта.

Решение подобных задач позволит впоследствии создать необходимые предпосылки по внедрению автоматизированных измерительных систем по проведению подобных экспериментов, что в значительной степени сократит как время проведения исследований, так и повысит их эффективность.

Предложено устройство, способ и алгоритм минимизации времени и усталости образца при подготовке эксперимента на основе микроконтроллера STM32. Применение данного устройства и алгоритма позволяет на 40 % снизить затраты времени на позиционирование образца и повысить стабильность условий проведения эксперимента в целом.

Список литературы: 1. Beadle R. Magnetic resonance spectroscopy in myocardial disease / R. Beadle, M. Frenneaux // Expert Rev. Cardiovasc. Ther. – 2010. – № 8. – Р. 269-277. 2. Эрнст Р. ЯМР в одном и двух измерениях / Р. Эрнст, Дж. Боденхаузен. – М.: Мир, 2000. – 711 с. 3. Пивоваров П.П. Теоретична технологія продукції громадянського харчування / П.П. Пивоваров. – Харків: Ранок, 2000. – 116 с. 4. Dey K.K. Trading sensitivity for information: Carr-Purcell-Meiboom-Gill acquisition in solid-state NMR / K.K. Dey, J.T. Ash, N.M. Trease, P.J. Grandinetti // J. Chem.Phys. – 2010. – 133 р. 5. Неронов Ю.И. Ядерный магнитный резонанс в томографии и в спектральных исследованиях. Учебное пособие / Ю.И. Неронов, З. Гарайбех / СПб.: Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (Технический университет), 2003. – 84 с. 6. Даниленко О.Ф. Автоматизирована система виміру ЯМР спектрометра / О.Ф. Даниленко, О.Г. Дьяков, О.І. Торяник // Прогресивні техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. Зб. наук. праць. Вип. 2. Харків. – 2005. – № 14. – С. 314-342. 7. Олсон Г. Цифровые системы автоматизации процесса управления / Г. Олсон, Д. Пиани / – СПб.: Невский диалект, 2002. – 254 с. 8. Аракелян Г. Математика и история золотого сечения: монография / Г. Аракелян. – М.: Логос, 2014. – 136 с. 9. Пантилеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантилеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа 2005. – 302 с. 10. Кнут Д. Конкретная математика. Основание информатики / Д. Кнут, Р. Грэхем, О. Паташник. – М.: Мир, Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 211 с.

References:

1. Beadle, R. and Frenneaux, M. (2010), "Magnetic resonance spectroscopy in myocardial disease", *Expert Rev. Cardiovasc. Ther.* No.8, pp. 269-277.
2. Ernst, R. and Bodenhausen, J. (2000), *NMR in one and two dimensions*. Mir, Moscow, 711 p.
3. Brewers, P. (2000), *Theoretical technology products catering*. Ranok, Kharkiv, 116 p.
4. Deym, K.K., Ash J.T., Trease N.M., Grandinetti P.J. (2010), "Trading sensitivity for information: Carr-Purcell-Meiboom-Gill acquisition in solid-state NMR". *Journal Chem.Phys.*, Vol. 5, pp. 133-143.
5. Neronov, Y.I. and Garaybeh, Z. (2003), *Nuclear magnetic resonance imaging and spectral studies*. Textbook St. Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University), St. Petersburg, 84 p.

6. Danilenko, O., Dyakov, O. and Toryanik, O. (2005), "Automatized system vimiru NMR spectrometer". Progressive technique and technology of food production and restaurant industry trade, No. 14. Kharkiv, pp. 314-342.
7. Olson, G. and Piani, D. (2002), *Digital automation management system process*. Nevsky Dialect, St. Petersburg, 254 p.
8. Arakelian, G. (2014), *Mathematics and history of the golden section monograph*. Logos, Moscow, 136 p.
9. Pantileev, A. Letov, T. (2005), *Optimization methods in examples and problems*. Higher School, Moscow, 302 p.
10. Knuth, D., Graham, R. and Patashnik, O. (2006), *Concrete Mathematics. Base Informatics*. Mir, Binomial, Knowledge Laboratory, Moscow, 211 p.

Поступила (received) 20.02.2016

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ"
Поворознюк А. И.*

Danilenko Alexander, Cand.Tech. Sci., Docent
Natoinal Tehnical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.:(057)707-61-65, e-mail: aleks.danilenko@gmail.com
ORCID : 0000-0002-0089-3510

Oleksuk Vitalij, Master
Natoinal Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.:(095)305-16-48, e-mail: nightstalker_07@mail.ru
ORCID : 0000-0003-4841-458X

Djakov Alexander, Cand.Tech. Sci., Docent
Kharkiv National University of food technology and trade
Str. Klochkovskaya, 131, Kharkov, Ukraine, 61015
Tel.:(057)732-44-26, e-mail: djakov.alex.georg@gmail.com
ORCID : 0000-0002-8163-8019

УДК 621.314.7

Забезпечення стабільності вимірювань в установці ЯМР-спектрометра
/ Даниленко О.Ф., Дьяков О.Г. Олексюк В.Е. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 11 – 19.

Проведено аналіз впливу параметрів вимірювальної установки ЯМР-спектрометра на інтенсивність луна-сигналу, що приймається. Запропоновано пристрій та обґрунтовано підхід щодо підвищення стабільності роботи та точності вимірювання параметрів на установці ЯМР-спектрометра, шляхом підтримування стабільної роботи високочастотного генератора, що задає побудованого на основі використання синтезатора частоти. Синтезатор частоти реалізовано апаратними засобами з використанням обчислювальної техніки. Розглянута можливість реалізації даного алгоритму на мікроконтролері. Іл.: 4. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: ЯМР-спектрометр, синтезатор частоти, обчислювальна техніка, вимірювання параметрів, луна-сигнал, мікроконтролер.

УДК 621.314.7

Обеспечение стабильности измерений в установке ЯМР-спектрометра
/ Даниленко А.Ф., Дьяков А.Г. Олексюк В.Э. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 11 – 19.

Проведен анализ влияния параметров измерительной установки ЯМР-спектрометра на интенсивность принимаемого эхо-сигнала. Предложено устройство и обоснован метод повышения стабильности режима работы установки ЯМР-спектрометр и точности измерения параметров контролируемого вещества, путем поддержки стабильной работы высокочастотного задающего генератора, построенного на основе применения синтезатора частоты. Синтезатор частоты реализован аппаратными средствами с использованием вычислительной техники. Рассмотрена возможность реализации предложенного алгоритма на микроконтроллере. Ил.: 4. Библиогр. 10 назв.

Ключевые слова: ЯМР-спектрометр, синтезатор частоты, измерение параметров, эхо-сигнал, микроконтроллер.

UDK 621.314.7

Increase of stability measurings parameters of setting NMR / *Danilenko A.F., Djakov A.G., Oleksuk V.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 11 – 19.*

The analysis of influencing of parameters of the measuring setting is conducted NMR-spectrometer on intensity of the adopted echo-signal. Offered and grounded method of increase of stability of the mode of operations of setting of NMR-spectrometer. A method is offered and grounded for the increase of exactness of measuring of parameters of the controlled matter. Stable work is supported by a high-frequency master clock, Generator is built on the basis of application of synthesizer of frequency. The synthesizer of frequency is realized vehicle with the use of facilities of the microcontroller. Figs.: 4. Refs.: 10 titles.

Keywords: synthesizer of frequency, measuring of parameters, measuring setting, NMR-spectrometer, echo-signal, microcontroller.

O.A. ДМИТРИЕВА, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ДонНТУ,
Красноармейск

О ПОСТРОЕНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ВАРИАЦИЕЙ ШАГА В РАСЧЕТНОМ БЛОКЕ

Предложены параллельные разностные схемы моделирования динамических объектов, позволяющие управлять размером шага при численном интегрировании. Расчетные схемы сформированы на основе многошаговых коллокационных блочных методов. Численные решения для каждого расчетного блока реализованы с использованием ньютоновских итераций. Ил.: 4. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: разностная схема, управление размером шага, коллокационный блочный метод, ньютоновская итерация.

Постановка проблемы. На текущий момент компьютерное моделирование является одним из наиболее распространенных и эффективных исследовательских приемов, которые используют для оценки поведения сложных динамических объектов [1]. В то же время, существует широкий класс задач, решение которых с помощью последовательного моделирования отмечается неприемлемыми временными затратами, а также недостаточной производительностью [2]. Этот факт влечет за собой необходимость использования для моделирования сложных объектов компьютерных систем с параллельной архитектурой [3 – 4]. Однако, несмотря на то, что научные исследования находятся на этапе, который характеризуется наличием современных средств огромной вычислительной мощности, характеристики параллелизма вычислений, такие, как ускорение и коэффициент эффективности, далеки от своих потенциальных оценок [2, 5]. В связи с этим актуальными становятся задачи, связанные с разработкой современных параллельных численных методов и адаптацией для параллельной реализации существующих [6]. Успешное решение этих задач определяет один из важнейших путей сокращения времени решения сложных и трудоемких задач, к которым, прежде всего, необходимо отнести задачу Коши (1) для систем дифференциальных уравнений большой размерности [7], описывающих поведение сложных динамических объектов

$$x' = f(t, x(t)), \quad x(t_0) = x_0. \quad (1)$$

Поскольку, как правило, найти аналитическое решение (1) не представляется возможным [8], применяют численные методы решения данной задачи. Получение решения необходимого порядка точности численными методами влечет за собой выполнение значительного

количества итераций. Усовершенствование методов нахождения численного решения задачи Коши позволяет не только сократить время получения результата, но и делает возможным решение задач большей размерности [9].

Анализ литературы. Одношаговые коллокационные методы для решения задачи Коши (1) строятся на интерполяционных многочленах, степени которых совпадают с количеством точек коллокации, а значения многочленов в этих точках совпадают с правыми частями дифференциального уравнения в расчетных точках [10]. При этом точки коллокации расположены регулярно и контроль оценки погрешности может обеспечиваться использованием правила Рунге, экстраполяцией Ричардсона, вложенными методами [7, 8], что, как правило, сводится к многократным просчетам с изменяющимся шагом.

В работе [9] для эффективного управления глобальной ошибкой численных схем предложены равнозначные блочные методы, в которых используется условие асимптотического равенства локальной и глобальной ошибок, но при этом шаг интегрирования должен быть достаточно малым.

Параллельная реализация численного решения (1) в [6] обеспечивается использованием одношаговых многоточечных блочных методов с различными размерностями расчетных блоков. При этом используются как коллокационные методы [10], так и методы типа Биккарта [11]. Однако внутри блока невозможно обеспечить изменение шага интегрирования. Этот вопрос становится наиболее актуальным, когда искомая функция (функции) на отдельных участках интегрирования характеризуется различными скоростями изменения. В этом случае целесообразно использовать для интегрирования адаптируемый шаг, что не позволяет обеспечить расчетные коллокационные схемы в [10, 11].

Цель статьи заключается в разработке параллельных разностных схем моделирования требуемого порядка точности, обеспечивающих возможность управления шагом интегрирования при численной реализации.

Генерирование разностных схем. Для устранения вышеописанных недостатков, связанных с невозможностью изменения шага интегрирования, в работе предлагаются новые расчетные схемы, которые также строятся на интерполяционных многочленах, степени которых совпадают с количеством точек коллокации, а значения многочленов в этих точках совпадают с правыми частями дифференциального уравнения в расчетных точках [6, 10]. При этом точки коллокации могут быть расположены нерегулярно, хотя, желательно (но не обязательно),

чтобы они были связаны между собой какими-либо коэффициентами пропорциональности, например, степенями двойки. Поскольку речь идет о многошаговых методах, необходимо выделить множество точек, формирующих опорный блок

$$t_{n,i} = t_{n,0} + i\tau_n \in [t_{n-m+1}, t_{n,0}], \quad i = -(m-1), -(m-2), \dots, 0,$$

а также множества точек, которые формируют расчетные блоки:

$$\begin{aligned} t_{n,i}^{(1)} &= t_{n,0} + i\tau_{n_1} \in [t_{n,0}, t_{n,s_1}], \quad i = 1, 2, \dots, s_1, \\ t_{n,i}^{(2)} &= t_{n,0} + i\tau_{n_2} \in [t_{n,0}, t_{n,s_2}], \quad i = 1, 2, \dots, s_2. \end{aligned}$$

При этом проще всего связать шаги интегрирования τ_{n_1} и τ_{n_2} соотношениями $\tau_{n_1} = 2\tau_{n_2}$. Тогда между размерностями расчетных блоков должно будет выполняться соотношение $s_2 = 2s_1$. Счет будет выполнять параллельно для двух расчетных схем с одинаковыми размерностями опорных блоков и с различающимися в s_2 / s_1 раз размерностями расчетных блоков. Канонический вид многошаговых коллокационных методов с числом опорных точек m и числом расчетных точек s_1 и s_2 соответственно, будет иметь вид

$$\begin{aligned} u_{n,i}^{(1)} &= u_{n,0} + \tau_n \sum_{j=1-m}^0 b_{i,j}^{(1)} F_{n,j} + \tau_{n_1} \sum_{j=1}^{s_1} a_{i,j}^{(1)} F_{n,j}^{(1)}, \quad i = 1, 2, \dots, s_1, \\ u_{n,i}^{(2)} &= u_{n,0} + \tau_n \sum_{j=1-m}^0 b_{i,j}^{(2)} F_{n,j} + \tau_{n_2} \sum_{i=1}^{s_2} a_{i,j}^{(2)} F_{n,j}^{(2)}, \quad i = 1, 2, \dots, s_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_{n,i}^{(1)}$, $u_{n,i}^{(2)}$ – приближенные значения решения задачи Коши (1) в точках $t_{n,i}^{(1)}$, $t_{n,i}^{(2)}$ соответственно; τ_n , τ_{n_1} , τ_{n_2} – шаги интегрирования в опорном блоке, в блоках размерностью s_1 и s_2 соответственно; $F_{n,j} = f(t_n + j\tau_n, u_{n,j})$ – правые части уравнения (1) в точках, $j = -(m-1), -(m-2), \dots, 0$, $F_{n,j}^{(1)} = f(t_n + j\tau_{n_1}, u_{n,j})$, $j = 1, 2, \dots, s_1$, $F_{n,j}^{(2)} = f(t_n + j\tau_{n_2}, u_{n,j})$, $j = 1, 2, \dots, s_2$, $a_{i,j}^{(1)}$, $b_{i,j}^{(1)}$, $a_{i,j}^{(2)}$, $b_{i,j}^{(2)}$ – коэффициенты расчетных схем в (2).

В отличие от подхода к оценке погрешности, который основывался на введении дополнительной точки в опорный блок и требовал генерирования двух расчетных схем [6], предлагаемый подход требует большего количества расчетных схем. В частности, необходимо

сгенерировать базовые расчетные схемы, соответствующие интегрированию с неизменным шагом, затем предусмотреть схемы для увеличения и сокращения шагов. Причем, схемы сокращения необходимо подготовить как для расчетного, так и для опорного блоков. Фактически генерирование этих схем сводится к определению расчетных коэффициентов и осуществляется один раз, до начала вычислений, подразумевая их многократное использование при решении различных задач. В качестве примера можно привести расчетные схемы для метода $((m \times s_1) \times (m \times s_2))$ со значениями параметров $m = 3$, $s_1 = 2$, $s_2 = 4$. Для получения разностных схем можно использовать интегро-интерполяционный метод. Формирование разностных схем методов и $(m \times s_1)$ и $(m \times s_2)$ подразумевает интегрирование в пределах, $(t_{n,0}, t_{n,i})$ с соответствующими значениями индексов и размерностями опорных блоков m

$$u_{n,i} = u_{n,0} + \int_{t_{n,0}}^{t_{n,i}} L_{m+s-1}(t) dt.$$

Основные расчетные схемы для метода $(m \times s_1)$ с узлами интерполяции $\{ \{t_n - 2\tau, F_{n,-2}\}, \{t_n - \tau, F_{n,-1}\}, \{t_n, F_{n,0}\}, \{t_n + \tau, F_{n,1}\}, \{t_n + 2\tau, F_{n,2}\} \}$ примут вид:

$$\begin{aligned} u_{n,1} &= u_{n,0} + \frac{\tau}{720} (11F_{n,-2} - 74F_{n,-1} + 456F_{n,0} + 346F_{n,1} - 19F_{n,2}), \\ u_{n,2} &= u_{n,0} - \frac{\tau}{90} (-F_{n,-2} + 4F_{n,-1} + 24F_{n,0} + 124F_{n,1} + 29F_{n,2}). \end{aligned} \quad (3)$$

Для метода $(m \times s_2)$ используются узлы интерполяции:

$$\begin{aligned} &\{ \{t_n - 2\tau, F_{n,-2}\}, \{t_n - \tau, F_{n,-1}\}, \{t_n, F_{n,0}\}, \{t_n + \tau/2, F_{n,\frac{1}{2}}\}, \{t_n + \tau, F_{n,1}\}, \\ &\{t_n + 3\tau/2, F_{n,\frac{3}{2}}\}, \{t_n + 2\tau, F_{n,2}\} \}. \end{aligned}$$

Сокращение шага основным методом $(m \times s_1)$:

$$\begin{aligned} u_{n,\frac{1}{2}} &= u_{n,0} + \frac{\tau}{28800} (37F_{n,-2} - 335F_{n,-1} + 7455F_{n,0} + 7808F_{n,\frac{1}{2}} - 565F_{n,1}), \\ u_{n,1} &= u_{n,0} + \frac{\tau}{1800} (-F_{n,-2} + 5F_{n,-1} + 285F_{n,0} + 1216F_{n,\frac{1}{2}} + 295F_{n,1}), \end{aligned} \quad (4)$$

увеличение шага основным методом $(m \times s_1)$:

$$\begin{aligned} u_{n,2} &= u_{n,0} + \frac{\tau}{900} (145F_{n,-2} - 704F_{n,-1} + 1635F_{n,0} + 755F_{n,2} - 31F_{n,4}), \\ u_{n,4} &= u_{n,0} - \frac{2\tau}{225} (20F_{n,-2} - 64F_{n,-1} - 15F_{n,0} - 320F_{n,2} - 74F_{n,4}). \end{aligned} \quad (5)$$

Такого же типа схемы генерируются для возможных сжатия и растяжения шага вспомогательными методами с учетом количества узлов интерполяции и их размещения. Из-за громоздкости расчетных формул в статье приводятся только основные разностные схемы. Кроме того, учитывая итерационный характер (4), для ускорения сходимости на первом шаге итерационного процесса используются предикторные формулы Адамса [5], которые также должны быть предварительно сгенерированы для всех вариантов изменения шага (растяжение, сжатие, постоянство).

Тестовая реализация параллельных алгоритмов управления шагом. В качестве примера выбрана тестовая задача [9], характеризующаяся существенно различающимся поведением искомых функций на отрезке интегрирования

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= 2t(x_2(t))^{1/5}x_4(t), \quad x_2'(t) = 10t \exp(5(x_3(t)-1))x_4(t), \\ x_3'(t) &= 2tx_4(t), \quad x_4'(t) = -2t \ln(x_1(t)), \\ x_1(0) &= 1, \quad x_2(0) = 1, \quad x_3(0) = 1, \quad x_4(0) = 1, \\ 0 \leq t &\leq 4 \end{aligned} \quad (6)$$

с известными точными решениями

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \exp(\sin^2(t)), \quad x_2(t) = \exp(5 \sin^2(t)), \\ x_3(t) &= \sin^2(t) + 1, \quad x_4(t) = \cos^2(t). \end{aligned}$$

Графики численных решений приведены на рис. 1, 2. На рис. 3 приведена динамика изменения шага, на рис. 4 – худшие показатели накопленных погрешностей, которые наблюдались при численном интегрировании функции $x_2(t)$.

При получении решений соотношение между локальной Ep и глобальной Tol погрешностями обеспечивалось на уровне $Tol \leq 10Ep \cdot (Ep = 10^{-8})$. Как видно из рис. 4, худшая накопленная погрешность ни на каком шаге интегрирования не превышает заданную Tol .

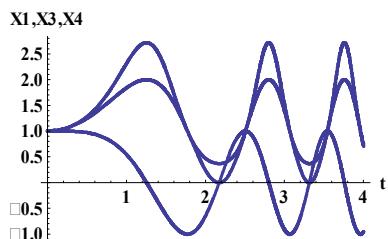


Рис. 1. Точные и численные решения по $x_1(t), x_3(t), x_4(t)$

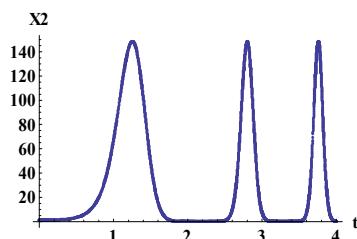


Рис. 2. Точное и численное решения по $x_2(t)$

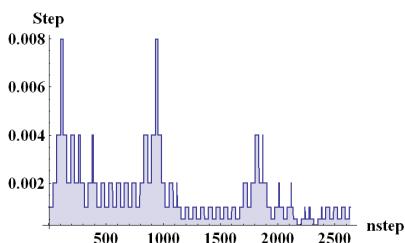


Рис. 3. Автоматическое изменение шага интегрирования

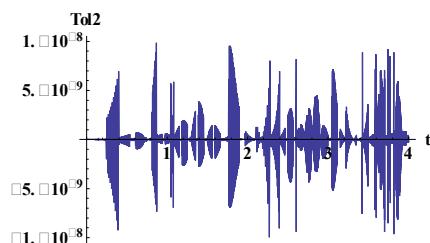


Рис. 4. Накопленная погрешность решения по $x_2(t)$

При проведении численных экспериментов кроме основных показателей, к которым относят локальную и глобальную погрешности численного решения, размеры и количество шагов интегрирования, оценивался коэффициент эффективности, характеризующий отношение количества результативных шагов к общему числу посчитанных. Кроме того, при проведении экспериментов с различными значениями индикаторов, которые обеспечивают принятие решения об изменении размера шага (параметр инерционности, количество итераций для уточнения решения методом Ньютона, близость текущей локальной погрешности к предельному отношению Tol / Ep и т.п.), получены зависимости, обеспечивающие достижение коэффициентом эффективности значений, близких к единице.

Выводы. Проведенные исследования позволили предложить новые подходы к решению проблемы параллельного управления точностью интегрирования на основе вариации длины шага. Управление шагом интегрирования основано на использовании многошаговых многоточечных коллокационных блочных методов с изменяемыми размерностями опорных и расчетных блоков с неравномерным расположением узлов, связанных между собой некоторыми

коэффициентами пропорциональности. Локальная погрешность численного интегрирования оценивалась как норма расхождений решений, полученных с разными порядками аппроксимации в совпадающих точках расчетного блока. Величина полученной погрешности и состояния значений индикаторов использовались для принятия решения о размере очередного шага интегрирования, что обеспечивало заданную точность на каждом участке. Численное решение для каждого расчетного блока осуществлялось с помощью итерационного процесса, для ускорения сходимости начальные приближения определялись с помощью предикторного метода Адамса. Для автоматического формирования вычислительных схем разработана программная система, основанная на использовании интегро-интерполяционного метода, позволяющая генерировать коэффициенты разностных уравнений с произвольными размерностями расчетных и опорных блоков, с возможностью перехода на схемы растяжения – сжатия шага. При необходимости сокращения длины шага, ранее посчитанные значения использовались в расчетных схемах как промежуточные, что позволило значительно сократить количество вычислительных операций. Оценки погрешности аппроксимации сформированы без использования точного решения.

Список литературы: 1. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – СПб.: БНВ-Санкт-Петербург, 2002. – 608 с. 2. Migdalas A. Parallel Computing in Optimization / A. Migdalas, M. Pardalos, S. Storoy. – Springer Verlag, 2012. – 463 p. 3. Дмитриева О.А. Паралельне моделювання динамічних об'єктів зі сконцентрованими параметрами / О.А Дмитриєва. – Харків: "Ноулідж". – 2014. – 336 с. 4. Hairer E. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems / E. Hairer, S. Nørsett, G. Wanner. – Springer Verlag, 1993. – 528 p. 5. Argyros I. Convergence and Applications of Newton-type Iterations / I. Argyros. – Springer Verlag, 2009. – 463 p. 6. Хайрер Э. Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems / E. Hairer, G. Wanner. – Springer Verlag, 1996. – 614 p. 7. Фельдман Л.П. Параллельные методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений блочными разностными схемами / Л.П. Фельдман // Известия Южного федерального университета. – 2007. – Т. 75. – № 3 – С. 47–60. 8. Вайнер Р. Эффективное управление точностью численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений и оптимальные интерполяционные равнозначные блочные методы с переменным шагом / Р. Вайнер, Г. Ю. Куликов // Журнал вычислительной математики и математической физики – 2014. – Т. 54. – № 4 – С. 591–607. 9. Дмитриева О.А. Коллокационные блочные методы с контролем на шаге / О.А. Дмитриева // Системы обработки информации. – 2015. – № 5 (130). – С. 78–84. 10. Дмитриева О.А. Разработка и обоснование параллельных одношаговых блочных методов типа Биккарта / О.А. Дмитриева // Системы обработки информации. – 2014. – № 7 (123). – С. 121–126.

References:

1. Voevodin, V.V. and Voevodin, Vl.V. (2002), *Parallel computing*, BHV, St. Petersburg, 608 p.
2. Migdalas, A., Pardalos, M. and Storoy, S. (2012), *Parallel Computing in Optimization*, Springer Verlag, 463 p.

3. Dmitrieva, O.A. (2014), *The parallel simulation of dynamic objects with concentrated parameters*, Noulidzh, Kharkiv, 336 p.
4. Hairer, E., Nørsett, S. and Wanner, G. (1993), *Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems*, Springer Verlag, 528 p.
5. Argyros, I. (2009), *Convergence and Applications of Newton-type Iterations*, Springer Verlag, 463 p.
6. Hairer, E. and Wanner, G. (1996), *Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems*, Springer Verlag, 614 p.
7. Feldman, L.P. (2007), "Parallel methods of solving the Cauchy problem for ordinary differential equations of block-difference schemes", *News of Southern Federal University*, Vol. 75, No. 3, pp. 47-60.
8. Weiner, R. and Kulikov, G.Yu. (2014), "Effective management of the accuracy of the numerical integration of ordinary differential equations and optimal interpolation methods equivalent block with variable pitch", *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Vol. 54, No. 4, pp. 591-607.
9. Dmitrieva, O.A. (2015), "Collocation methods to control block in step", *Information processing systems*, No. 5 (130), pp. 78-84.
10. Dmitrieva, O.A. (2014), "Development and support of parallel one-step block methods such of Bickart", *Information processing systems*, No. 7 (123), pp. 121-126.

Поступила (received) 15.07.2015

Статью представил д-р техн. наук, проф. ДонНТУ Бацков Е.А.

Dmitrieva Olga, Dr. Sci.Tech, Professor
Donetsk National Technical University
Pl. Shibankova, Krasnoarmejsk, 1, Ukraine, 85301
Tel.: (050) 998-11-75, e-mail: dmitrieva.donntu@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-8921-8433

УДК 004.272.2:519.63

Про побудову паралельних різницевих схем моделювання з варіацією кроку в розрахунковому блоці / Дмитрієва О.А // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 20 – 28.

Запропоновано паралельні різницеві схеми моделювання динамічних об'єктів, що дозволяють керувати розміром кроку при чисельному інтегруванні. Розрахункові схеми сформовані на основі багатокрокових колокаційних блокових методів. Чисельні розв'язки для кожного розрахункового блоку реалізовані з використанням ньютонівських ітерацій. Іл.: 4. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: різницева схема, керування розміром кроку, колокаційний блоковий метод, ньютонівська ітерація.

УДК 004.272.2:519.63

О построении параллельных разностных схем моделирования с вариацией шага в расчетном блоке / Дмитриева О.А // Весник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 20 – 28.

Предложены параллельные разностные схемы моделирования динамических объектов, позволяющие управлять размером шага при численном интегрировании. Расчетные схемы сформированы на основе многошаговых коллокационных блочных методов. Численные решения для каждого расчетного блока реализованы с использованием ньютоновских итераций. Ил.: 4. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: разностная схема, управление размером шага, коллокационный блочный метод, ньютоновская итерация.

UDC 004.272.2:519.63

About development of parallel difference schemes modeling with variation steps in the settlement block / Dmitrieva O.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 21 (1193). – P. 20 – 28.

Offered the parallel difference schemes for modeling of dynamic objects that allow you to control the step size in numerical integration. Calculation schemes are formed on the basis of collocation multistep block methods. Numerical solutions for each calculated block implemented using Newtonian iterations. Figs.: 4. Refs.: 12 titles.

Keywords: difference scheme, control the step size, collocation multistep block method, Newton iteration.

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Н.В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Г.В. ГЕЙКО, ст. преп., НТУ "ХПИ"

ДИСКРЕТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ АРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССТОЯНИЯ ХЕММИНГА

Проанализированы недостатки меры близости изображений, используемой в дискретной нейронной сети адаптивной резонансной теории (АРТ) АРТ-1. Предложена дискретная сеть АРТ с использованием в качестве меры близости изображений расстояние Хемминга. Разработана стабильно пластичная нейронная сеть Хемминга, способная распознавать новую информацию на своих входах. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: нейронная сеть, адаптивная резонансная теория, расстояние Хемминга, мера близости изображений.

Постановка проблемы и анализ литературы. Дискретная нейронная сеть адаптивной резонансной теории АРТ-1 [1 – 4] имеет важные преимущества перед многими другими нейронными сетями, поскольку может дообучаться в процессе своего функционирования, сохраняя при этом накопленную ранее информацию, а также может обнаруживать на своих входах новую информацию, которая не соответствует ни одному вектору или чёрно-белому изображению, хранящемуся в её памяти. Этим она отличается от большинства нейронных сетей [5 – 9], в частности, перцепtronов, которые для запоминания дополнительной информации требуют, как правило, своего полного переобучения и реагируют на любую входную информацию (новую или хранимую в памяти) выходными сигналами. Однако, дискретная нейронная сеть АРТ-1 (рис.1) обладает и определёнными недостатками:

- результаты её обучения классическим алгоритмом [1, 2] в общем случае зависят от порядка следования изображений в обучающей последовательности;
- мера близости изображений, хранимых в памяти сети и поступающих на её входы, определяется с помощью параметра сходства:

$$p = \|Z\|/\|S\|,$$

где $\|Z\|$ – норма вектора (изображения) хранящегося в памяти сети, которая вычисляется как сумма его единичных компонент; $\|S\|$ – норма входного вектора (рис. 1).

Из определения параметра сходства следует, что близость чёрно-

белых изображений определяется только расположением их единичных (чёрных) компонент.

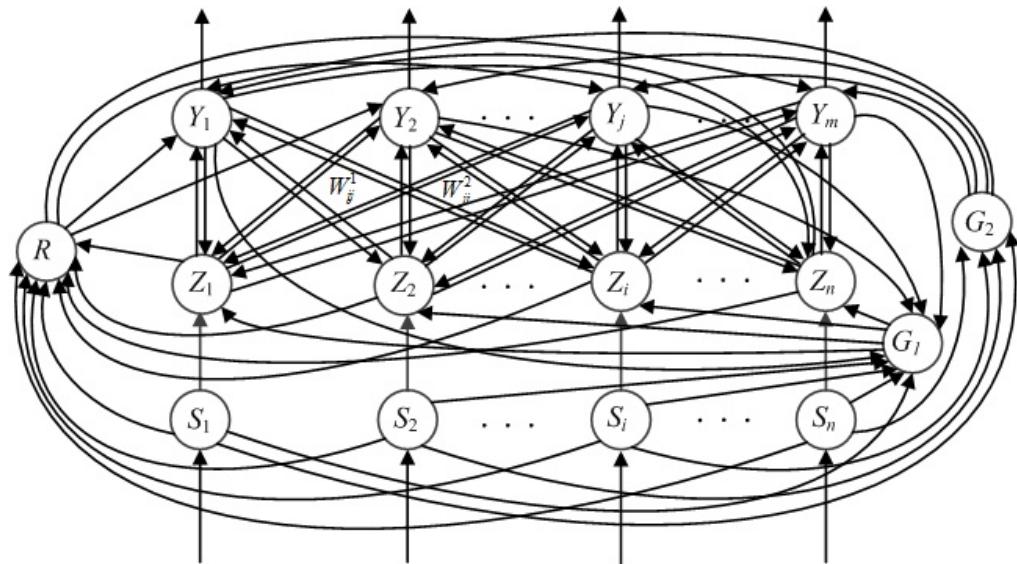


Рис. 1. Дискретная нейронная сеть АРТ-1

Например, если два изображения Z , S содержит по 100 компонент, из которых у каждого изображения имеется только по 10 единичных компонент, причём, в обоих изображениях одинаково расположены только пять единичных компонент, то параметр сходства в этом случае равен:

$$p = \|Z\|/\|S\| = 5/10 = 0,5.$$

Такое значение параметра сходства указывает на то, что изображения Z и S существенно отличаются друг от друга. Однако, применение других мер близости к этим изображениям, например, с использованием расстояния Хемминга, указывает на определённую близость этих изображений. Действительно, расстояние Хемминга в этом случае равно 10 (десять несовпадающих двоичных компонент изображений), а отношение числа совпадающих компонент к их общему числу равно 0,9. Таким образом, изображения отличаются только 10% своих компонент, что указывает на существенное сходство сравниваемых изображений.

В связи с этим, возникает проблема разработки дискретных нейронных сетей АРТ использующих меру сходства изображений с применением расстояния Хемминга.

Целью статьи является разработка дискретной нейронной сети АРТ, использующей для сравнения изображений все компоненты чёрно-белых изображений, в частности, расстояние Хемминга.

Архитектуру нейронной сети определяет три слоя нейронов: входной S -слой бинарных нейронов, интерфейсный слой Z -нейронов и выходной или распознающий слой Y -нейронов. Кроме этого, имеется два управляющих нейрона G_1 и G_2 и решающий нейрон R .

Различают два режима функционирования нейронной сети – режим обучения и режим распознавания. Если в памяти нейронной сети перед началом обучения не хранятся какие-либо изображения, то между нейронами Y - и Z -слоя задаются, обычно, следующие веса связей:

$$W_{ij}^1 = \frac{1}{1+n}, \quad W_{ji}^2 = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Веса всех остальных связей между нейронами могут быть приняты равными единице. Перед началом режима обучения выходные сигналы всех нейронов сети "обнуляются", а также задаётся требуемое значение параметра сходства p_3 . Обучение сети начинается с подачи на её входы первого изображения $S^1 = (S_1^1, S_2^1, \dots, S_i^1, \dots, S_n^1)$, в результате чего определяются входные и выходные сигналы нейронов S -слоя:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх}S_i} &= S_i^1, \quad i = \overline{1, n}, \\ U_{\text{вых}S_i} &= U_{\text{вх}S_i}, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Выходные сигналы нейронов S -слоя поступают на входы решающего нейрона R , управляющих нейронов G_1 и G_2 и нейронов Z -слоя. С помощью сигналов элементов S -слоя нейрон R определяет норму вектора (изображения) S^1

$$\|S^1\| = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}S_i}$$

и подготавливается для определения в дальнейшем параметра сходства p . Единичными сигналами с выходов S -нейронов управляющие нейроны G_1 и G_2 переводятся в активное состояние и подготавливают срабатывание нейронов Z - и Y -слоя. Определяются входные сигналы нейронов интерфейсного слоя:

$$U_{\text{вх}Z_i} = U_{\text{вых}S_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

По правилу "два из трёх", то есть при наличии единичных сигналов из двух источников (с выходов S -нейронов и управляющего нейрона G_1), переводятся в активное состояние Z -элементы:

$$U_{\text{вых}Z_i} = U_{\text{вх}Z_i} \cap U_{\text{вых}G_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Выходные сигналы Z -элементов поступают на входы распознающих нейронов, где суммируются и определяют входные сигналы Y -элементов:

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

Элементы распознающего слоя также срабатывают по правилу "два из трёх", поскольку на их входы поступают единичные сигналы из двух источников: из Z -слоя и с выхода элемента G_2 . Нейроны Y -слоя имеют линейную функцию активации с единичным коэффициентом наклона, поэтому имеем:

$$U_{\text{вых}Y_i} = U_{\text{вх}Y_i}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Затем, с помощью вспомогательной нейронной сети, на рис. 1 не показанной, выделяется нейрон-победитель Y_τ , имеющий максимальный выходной сигнал. Если таких нейронов несколько, а в рассматриваемом случае все m элементов распознающего слоя имеют одинаковые выходные сигналы, то выделяется нейрон с минимальным индексом. В нашем случае – Y_1 , выходной сигнал этого нейрона задаётся равным единице, а выходы всех остальных нейронов обнуляются:

$$U_{\text{вых}Y_1} = 1, \quad U_{\text{вых}Y_j} = 0, \quad j = \overline{2, m}.$$

Единичный выходной сигнал нейрона-победителя сбрасывает в нуль управляющий нейрон G_1 и поступает на входы нейронов Z -слоя, которые срабатывают по правилу "два из трёх", но при этом учитывается единичный сигнал нейрона-победителя из Y -слоя, а не с выхода управляющего нейрона G_1 . Поскольку выполняется соотношение (1) для весов связей W_{ji}^2 , то имеем:

$$U_{\text{вых}Z_i} = W_{1i}^2 U_{\text{вых}S_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

то есть в единичное состояние переходят все Z -нейроны, на входы которых поступают единичные сигналы с выходов элементов входного слоя.

Вектор выходных сигналов элементов Z -слоя ($U_{\text{вых}Z_1}, U_{\text{вых}Z_2}, \dots, U_{\text{вых}Z_n}$) поступает на вход решающего нейрона R , который вычисляет норму:

$$\|U_{\text{вых}Z}\| = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}Z_i} = \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}S_i}$$

и величину параметра сходства $p = \|U_{\text{вых}Z}\| / \|S^1\| = 1 > p_3$. Поскольку определённое значение параметра сходства больше заданного, то на выходе R -нейрона остаётся нулевой сигнал и нейрон Y_1 может запомнить в весах своих связей изображение S^1 . При этом корректируются веса связей между нейроном-победителем Y_1 и нейронами Z -слоя:

$$W_{i1}^1 = \frac{2U_{\text{вых}Z_i}}{1 + \|U_{\text{вых}Z}\|}, \quad i = \overline{1, n}, \quad W_{ii}^2 = U_{\text{вых}Z_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Если подаваемое на вход изображение S^1 не является первым запоминанием изображения, то нейрон-победитель Y_j при первом предъявлении изображения S^1 может не подойти по величине параметра сходства, поскольку может оказаться, что $p < p_3$. В этом случае на выходе решающего нейрона появляется единичный выходной сигнал, который затормаживает нейрон Y_j ($U_{\text{вых}Y_j} = -1$) и начинается поиск нового нейрона-победителя. Если входное изображение является представителем нового класса изображений, то будут заторможены все распределённые Y -нейроны, а новое изображение запомнит не распределённый распознающий нейрон с минимальным индексом.

Функционирование сети в режиме распознавания отличается, в основном, от её функционирования в режиме обучения только тем, что не меняются веса связей между Y - и Z -нейронами.

Описанный алгоритм обучения нейронной сети имеет недостатки, которые поясним с помощью следующего примера.

Пример 1. Требуется с помощью нейронной сети АРТ-1 разделить множество M из десяти векторов

$$M = \{S^1 = (1,1,0,0,0,0,1,1), S^2 = (0,1,0,0,0,0,1,1), S^3 = (1,0,0,0,0,0,1,1), \\ S^4 = (1,1,0,0,0,0,0,1), S^5 = (1,1,0,0,0,0,1,0), S^6 = (0,0,1,1,1,1,0,0), \\ S^7 = (0,0,0,1,1,1,0,0), S^8 = (0,0,1,0,1,1,0,0), S^9 = (0,0,1,1,0,1,0,0), \\ S^{10} = (0,0,1,1,1,0,0,0)\}$$

на минимальное число классов. Напрашивается классификация из двух классов: $\{S^1, S^2, S^3, S^4, S^5\}$ и $\{S^6, S^7, S^8, S^9, S^{10}\}$, при которой векторы в каждом из классов отличаются друг от друга одной или двумя компонентами. Используем для классификации этих векторов нейронную сеть АРТ-1 с параметрами: $n = 8$ – число компонент входных векторов и одновременно число нейронов в S - и Z -слое; $m = 7$ – число распознающих Y -нейронов; параметр сходства $p_3 = 0,5$; начальные веса связей нейронной сети между слоями Y - и Z -нейронов:

$$W_{ij}^1 = \frac{1}{1+n} = 0,11; \quad W_{ij}^2 = 1; \quad i = \overline{1,8}, \quad j = \overline{1,7}.$$

Обучение нейронной сети векторами S^1, S^2, S^3, S^4, S^5 и расчёт матриц весовых коэффициентов сети приводит к следующим результатам:

$$W^1 = \begin{vmatrix} 0,50 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,50 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,00 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,50 & 0,11 & \dots & 0,11 \\ 0,00 & 0,50 & 0,11 & \dots & 0,11 \end{vmatrix}, \quad W^2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Легко убедиться, что последующая подача векторов S^1, S^2, \dots, S^{10} на вход сети в режиме обучения не приводит к изменению первых двух столбцов матрицы W^1 и первых двух строк матрицы W^2 .

Из анализа матриц W^1 и W^2 следует, что множество векторов S^1, S^2, \dots, S^5 разбивается на два класса: $\{S^1, S^2, S^3\}$ и $\{S^4, S^5\}$. Причём, результаты классификации зависят и от порядка векторов в обучающей последовательности. Полученные результаты связаны с тем,

что нейронная сеть АРТ-1 запоминает пересечения входных бинарных векторов. А пересечение этих векторов даёт вектор с нулевыми компонентами:

$$S^1 \cap S^2 \cap S^3 \cap S^4 \cap S^5 = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}.$$

Поэтому нейронная сеть АРТ-1 с классическим алгоритмом обучения не способна исходное множество векторов M разделить на два класса.

Для преодоления этого недостатка были предложены алгоритмы обучения нейронной сети АРТ-1 с учителем и без адаптации весов связей распределённых распознающих нейронов. Для решения поставленной задачи классификации учитель должен обучить сеть запоминанию только двух векторов: S^1 и S^6 .

При параметре сходства $p_3 = 0,75$ нейронная сеть относит первые пять векторов к первому классу, а оставшиеся – ко второму, так как при сравнении входных векторов с одним из запомненных получаются параметры сходства, равные единице. Эти же величины параметра сходства получаются и при подаче на вход нейронной сети векторов с единственной единичной компонентой, что может порождать ошибочные классификации входных векторов.

Для преодоления этого недостатка сети предлагается изменить архитектуру и алгоритмы функционирования нейронной сети АРТ-1:

1. Классический алгоритм обучения сети АРТ-1 заменяется заданием учителем эталонных изображений в весах связей распознающих нейронов (с определением весов связей между Y - и Z -нейронами).

2. В режиме классификации входных векторов связи W_{ji}^2 ($i = \overline{1, n}$), с выхода нейрона-победителя переключаются на входы решающего нейрона R вместо входов Z -элементов.

3. Мера близости входного вектора (изображения) и вектора, хранящегося в весах связей победившего Y -нейрона, определяется с помощью расстояния Хемминга R_x , которое сравнивается с предельно допустимым расстоянием Хемминга R_{xd} . Если $R_x \leq R_{xd}$, то входное изображение относится к классу изображений (векторов), хранящихся в весах связей нейрона-победителя J . Если $R_x > R_{xd}$, то указанного отношения нет и нейрон Y_J должен быть заторможен единичным сигналом с выхода решающего нейрона R . Затем, как и в обычной сети АРТ-1, начинается поиск другого нейрона-победителя. Каждый Y -нейрон

в сети АРТ-1 хранит или будет хранить информацию только об одном изображении.

Подобный слой запоминающих нейронов имеет и сеть Хемминга (рис. 2) [1, 2, 4], где каждый Z -нейрон в весах своих связей хранит информацию также об одном изображении, являющемся представителем (эталоном) своего класса (без нейрона Σ и его связей).

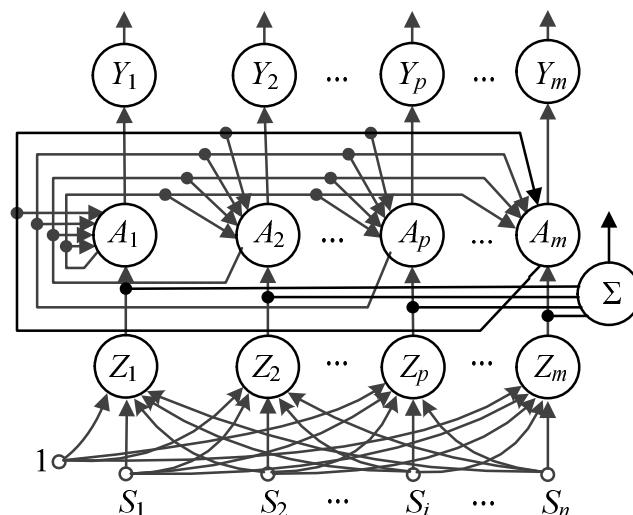


Рис. 2. Нейронная сеть Хемминга (без нейрона Σ и его связей)

Если в слой Z -нейронов сети Хемминга ввести дополнительные Z -нейроны (и соответствующие им A - и Y -нейроны), способные запоминать новую информацию (эталонные изображения новых классов), то такая сеть также сможет дообучаться и будет обладать свойствами стабильности и пластичности, то есть свойствами дискретной нейронной сети АРТ-1.

Еще одно достоинство нейронных сетей АРТ – возможность выделять новую информацию. Это достигается тем, что входное изображение сравнивается по величине параметра сходства с эталонными изображениями, хранящимися в весах связей распознающих нейронов.

Если входное изображение относится к новому классу, то при сравнении с любым эталонным изображением, хранящимся в весах связей распределенных распознающих нейронов, получается параметр сходства меньше минимально допустимого. Поэтому в результате такого сравнения все распределенные распознавающие Y -нейроны будут заторможены, что и является признаком того, что входное изображение несет новую информацию, которой нет в памяти нейронной сети АРТ.

В нейронной сети Хемминга сравнение изображений (или биполярных векторов) выполняется по числу компонент, в которых входное и эталонное изображения совпадают: $a = n - R_x$, где n – число компонент изображения; R_x – расстояние Хемминга между изображениями. Поэтому по аналогии с нейронными сетями АРТ можно задать минимально допустимое значение числа совпадающих компонент a_{\min} , при которых могут сравниваться входное и эталонное изображения, а при $a < a_{\min}$ входное изображение и эталонное несравнимы или, другими словами, входное изображение несет новую информацию по сравнению с изображением, хранящимся в весах связей нейронной сети. Учесть значение a_{\min} в архитектуре нейронной сети несложно – достаточно ввести дополнительное смещение на нейроны Z -слоя (точнее – изменить величину смещения $n/2$). При этом выходные сигналы Z -нейронов будут описываться соотношением (2):

$$U_{\text{вых}Z_p} = \frac{n}{2} - a_{\min} + 1 + \sum_{i=1}^n U_{\text{вых}S_i} w_{ip} = a - a_{\min} + 1, \quad p = 1, \dots, q, \quad (2)$$

где q – число Z -нейронов, хранящих эталонные изображения.

Из (2) следует:

$$U_{\text{вых}Z_p} = \begin{cases} 0, & \text{если } a < a_{\min}, \\ 1, & \text{если } a = a_{\min}, \\ U_{\text{вых}Z_p} > 1, & \text{если } a > a_{\min}. \end{cases}$$

Таким образом, если на выходе всех распределенных Z -нейронов выходные сигналы равны нулю ($U_{\text{вых}Z_p} = 0, p = 1, \dots, q$), то входное изображение по принятому критерию близости изображений не является похожим ни на одно из известных эталонных изображений и несет новую информацию.

Для аппаратного определения новизны входного изображения в архитектуру нейронной сети Хемминга достаточно ввести один нейрон Σ , суммирующий выходные сигналы всех нейронов Z -слоя (рис. 2). Если после предъявления входного изображения на выходе нейрона Σ нулевой выходной сигнал, то это означает, что входное изображение по расстоянию Хемминга находится далеко от эталонных изображений, хранящихся в весах связей нейронов Z -слоя, и является представителем нового класса изображений. Если после предъявления входного изображения выходной сигнал нейрона Σ положителен, то это означает,

что входное изображение является представителем известного класса изображений, хранящегося в памяти нейронной сети.

Выводы. Анализ функционирования дискретной нейронной сети АРТ-1 показал, что мера близости изображений, используемая в этой нейронной сети, обладает определёнными недостатками, поскольку использует для определения сходства изображений только единичные (чёрные) элементы чёрно-белых изображений. В связи с этим, для оценки сходства изображений предлагается в дискретной нейронной сети АРТ-1 использовать расстояние Хемминга, которое учитывает все элементы сравниваемых изображений. На основе модифицированной дискретной сети АРТ-1 предложена сеть Хемминга, обладающая свойством стабильности-пластичности и способная обнаруживать новую информацию на своих входах.

Список литературы: 1. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications / L. Fausett – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p. 2. Дмитриенко В.Д. Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с. 3. Дмитриенко В.Д. Алгоритмы обучения дискретных сетей АРТ без адаптации весов связей распределённых распознавающих нейронов / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, И.П. Хавина // Вестник НТУ "ХПИ". – 2006. – №23. – С. 35-48. 4. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с. 5. Sapozhnikova Elena P. ART-Based Neural Networks for Multi-label classification / E.P. Sapozhnikova // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – Р. 167-177. 6. Рутковская Д.С. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д.С. Рутковская, М.В. Пилинский, Л.П. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с. 7. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 9. Рутковский Лешек Методы и технологии искусственного интеллекта / Лешек Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.

References:

1. Fausett, L. (1994), *Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications*. Prentice Hall International Inc., New Jersey, 461 p.
2. Dmitrienko V.D. and Korsunov N.I. (2001), *Fundamentals theory of neural networks*. BYYMMAP, Belgorod, 159 p.
3. Dmitrienko V.D., Noskov V.I. and Khavina I.P. (2006), "Learning Algorithms of discrete networks ART without adaptation of the weights distributed recognizing neurons". *Herald of the NTU "KhPI"*, Vol. 23, pp. 35-48.
4. Dmitrienko V.D. and Zakovorotniy A.Y. (2013) *Modelling and optimization of management processes diesel trains*. Pub. center "NTMT", Kharkiv, 248 p.
5. Sapozhnikova, Elena P. (2009), "ART-Based Neural Networks for Multi-label classification", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 167-177.
6. Rutkowska D.S., Pilinski M.V. and Rutkowski L.P. (2004), *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems*. Horiachaia lynyia – Telekom, Moscow, 452 p.

7. Barsky, A.B. (2004), *Neural networks: recognition, management, decision-making*. Fynansy y statystyka, Moscow, 176 p.
8. Haykin, S. (2006), *Neural Networks: a complete course*. Pub. house "Williams", Moscow, 1104 p.
9. Rutkowski, L. (2010), *Methods and techniques of artificial intelligence*. Horiachaia lynyia – Telekom, Moscow, 520 p.

Поступила (received) 18.03.2016

Статью представил д-р техн. наук, академик Транспортной Академии наук Украины В.И. Носков

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

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

Mezentsev Nikolay, Cand. Tech.Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: besitzer@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

Gejko Gennadij, Senior Lecturer
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 929-85-28, e-mail: e2901@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0001-6958-8306

УДК 004.383

Дискретна нейронна мережа АРТ з використанням відстань Хеммінга / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Мезенцев М.В., Гейко Г.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 29 – 40.

Проаналізовані недоліки міри близькості зображенень, яка використовується в дискретній нейронній мережі адаптивної резонансної теорії (АРТ) АРТ-1. Запропонована дискретна мережа АРТ з використанням в якості міри близькості зображенень відстань Хеммінга. Розроблена стабільно пластична нейронна мережа Хеммінга, здатна розпізнавати нову інформацію на своїх входах. Іл.: 2. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: нейронна мережа, адаптивна резонансна теорія, відстань Хеммінга, міра близькості зображенень.

УДК 004.383

Дискретная нейронная сеть АРТ с использованием расстояния Хемминга / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В. // Весник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – № 21 (1193). – С. 29 – 40.

Проанализированы недостатки меры близости изображений, используемой в дискретной нейронной сети адаптивной резонансной теории (АРТ) АРТ-1. Предложена дискретная сеть АРТ с использованием в качестве меры близости изображений расстояние Хемминга. Разработана стабильно пластичная нейронная сеть Хемминга, способная распознавать новую информацию на своих входах. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: нейронная сеть, адаптивная резонансная теория, расстояние Хемминга, мера близости изображений.

UDC 004.383

Discrete neural network ART using a Hamming distance / Dmitrienko V.D., Zakovorotniy A.Y., Mezentsev N.V., Gejko G.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 29 – 40.

Disadvantages of image proximity measure that is used in discrete neural network of adaptive resonance theory (ART) ART-1 are analyzed. The discrete network ART that uses the Hamming distance as an image proximity measure is proposed. Stable plastic Hamming neural network that is able to recognize the new information on its inputs is developed. Figs.: 2. Refs.: 9 titles.

Keywords: neural network, adaptive resonance theory, Hamming distance, image proximity measure.

A.P. КОРСУНОВ, канд. техн. наук, доц., УПА, Харків

ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ АКТИВІЗАЦІЇ ТКАНИННИХ СТРУКТУР ОРГАНІЗМУ

В статті розглянуто рішення проблеми підвищення якості терапії в сеансах електромагнітного впливу за рахунок підвищення точності локалізації променю впливу на обраній області опромінення, зниження рівня паразитного впливу на сусідні структури організму та системи захисту від дестабілізуючих факторів, що в цілому забезпечується системою управління якістю терапевтичних послуг. Бібліогр: 10 назв.

Ключові слова: якість терапії, електромагнітний вплив, структура організму, точність локалізації променю впливу.

Постановка проблеми. Використання різноманітних засобів інформації при електромагнітному впливі на біоструктури в наукових дослідженнях з біофізики та біоелектроніки, практичній медицині набуло широкого характеру. При цьому необхідна розробка теоретичних зasad формування електромагнітних сигналів та відповідної апаратної платформи для переносу електромагнітних інформаційних сигналів запrogramованого впливу на біоструктури до самих об'єктів. Це дозволить вирішити проблему адаптації до особливостей організмів параметрів електромагнітного впливу на біооб'єкт. В зв'язку з цим необхідно, щоб передача розглянутих сигналів по каналах системи не приводила до перекручення електромагнітної оболонки, що створюється навколо об'єкту.

Аналіз літератури. окремі аспекти ізольованої дії магніто- і НВЧ впливів на біоструктури розглянуті в ряді робіт авторитетних дослідників [1 – 4], але живі істоти сформувались під постійним сполученим впливом магніто- та НВЧ чинників як від магнітного поля Землі, так і електромагнітних полів, що знаходяться в зоні радіопрозорості земної атмосфери [5]. Існують серійні апарати мікрохвильового опромінення типу "Луч" з модифікаціями [4]. Вони опромінюють біооб'єкти через слабо спрямовані антени типу відкритий кінець хвилеводу, через що формується мало локалізоване опромінення. Помітна частина мікрохвильової енергії не випромінюється через відбиття від відкритого кінця хвилеводу. Значні затрати енергії виникають за рахунок відбиття від самого об'єкту. Все це приводить до втрат 50 – 70% енергії опромінення.

Мета статті. Розробка моделей ефективного поглинання низько інтенсивних електромагнітних сигналів біоструктурами з визначеною специфічною дією.

Розробка методів впливу електромагнітними сигналами. При

© А.Р. Корсунов, 2016

розробці процесів електромагнітного поглинання необхідно враховувати, що смуго-пропускаючі або відбиваючі біоструктури, мають або резонансні можливості без поглинання, або характеризуються зростанням поглинання зі зміною кута падіння. Так на основі ефекту "швидких" поверхневих хвиль в поглинаючих середовищах можливе існування структур з низьким коефіцієнтом відбиття при великих кутах падіння.

Поверхневі Е-хвилі виникають при тих частотах, для яких хвилеве число $k_0 = 2\pi/\lambda$ задовольняє співвідношеню

$$k_0 = \frac{m\pi}{b\sqrt{\varepsilon_{r2}^1 - 1}}, \quad m = 0, 1, 2, 3,$$

а для поверхневих Н-хвиль k_0 задовольняю співвідношеню

$$k_0 = \frac{(m-0,5)\pi}{b\sqrt{\varepsilon_{r2}^1 - 1}}, \quad m = 0, 1, 2, 3.$$

Таким чином, аналіз моделі дистанційного опромінювання показав, що обираючи кут падіння ЕМП під час опромінення, необхідно контролювати рівень відбиття сигналу від поверхні біоструктури, мінімізуючи його [6].

Основні типи випромінювачів магнітного поля (МП), які використовуються на теперішній час в магнітобіології, це різновидність штучних випромінювачів типу "лінійний провідник" (ЛП). Напруженість подібного опромінювача відображається наступним співвідношенням

$$\vec{H}_\varphi = \frac{\vec{I} \cdot \vec{L}}{4\pi \cdot r^2} \sin \theta,$$

де \vec{r} – відстань від центру ЛП до точки випромінювання; θ – кут між віссю ЛП і \vec{r} ; \vec{I} – струм в провіднику; \vec{L} – довжина.

В даному розділі підкреслено, що біоструктури формувались в середовищі магнітного поля Землі, яке моделюється не "штучним" випромінювачем, а математичною моделлю за теорією геомагнетизму Гауса. Скалярний магнітний потенціал n -го мультиполя цієї моделі в сферичній системі координат R, φ, θ аналітично відображається рівнянням наступного виду

$$U_n = \frac{1}{4\pi R^{n+1}} \sum_{m=0}^n (q_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin \varphi) \cdot P_n^m(\cos \theta),$$

де q_{nm}, h_{nm} – постійні коефіцієнти; m – порядковий номер елементарного мультиполя n -го порядку; $P_n^m(\cos \theta)$ – приєднані функції Лежандра

першого роду. З точки зору формування біотропних параметрів звідси необхідно виділити в першу чергу вісевий дипольний момент зональної гармоніки ($n = 1, m = 0$), магнітне поле якої не залежить від кутової координати ϕ , що забезпечує рівномірний вплив цієї складової МП на біооб'єкт. При диференціюванні U_n по координаті θ одержимо гармонічний ряд у вигляді суми мультиполів:

$$H_\theta = -\frac{1}{4\pi R^{n+2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial U_n}{\partial \theta}.$$

З практичної точки зору відмітимо перші три гармоніки ряду, а саме:

$$H_{01} = \frac{1}{4\pi R^3}, \quad H_{02} = \frac{1}{4\pi R^4}, \quad H_{03} = \frac{1}{4\pi R^5}$$

при $\theta = 90^\circ$ і $\phi = 0^\circ$. Якщо виток МП відповідає розглянутій моделі, то біооб'єкт в залежності від відстані опромінюється МП означеної структури.

Прийнявши в першому наближенні [7], що розглянуті процеси носять адитивний характер, визначимо функціонал самого процесу впливу в наступному вигляді:

$$\Pi(t)_i \xrightarrow{M_j^p(t)} \Pi(t, M_j^p(t))_i + \Pi(M_k^d(t))_i,$$

де $\Pi(t)_i$ – функція по одному із параметрів біооб'єкта без впливу МНВЧ; $M_j^p(t)$ – деякий комплекс параметрів впливу; $M_k^d(t)$ – комплекс перешкод від МНВЧ на вимірювально-діагностичну систему.

При перешкоді $S(t)$ імовірність перекручень визначається наступним чином [8]

$$P = \int_{U_m}^S f(S) dS = F(U_m/\sigma),$$

тобто, при підвищенні співвідношення рівня сигналу U_m та середньоквадратичного значення σ перешкоди імовірність похибки різко зменшується. Наприклад, при прийомі двохпозиційного сигналу ідеальним приймачем, якщо $U_m/\sigma = 3$ значення $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$, а при $U_m/\sigma = 4,5$ маємо $P = 1,3 \cdot 10^{-6}$. Таким чином, система автоматичного регулювання потужності (АРП) з динамічним діапазоном в 27dB

забезпечить достатньо високий рівень відсутності перекручень інформаційного сигналу [9, 10].

Висновок. Одержані результати забезпечать високо стабільний та адаптивний до впливу дестабілізуючих факторів терапевтичний процес, оскільки в системі виключається перевантаження вхідних ланцюгів приймачів.

Список літератури: 1. Hallet M. Magnetic stimulation in clinical neurophysiology. – Ed.Elsivier. – V. 2nd. – 2005. – P. 38-46. 2. Mills K.R. Magnetic stimulation of the human nervous system / K.R. Mills. – Oxford: University Press, 1999. – 647 p. 3. Pascuale-Leone A. Handbook of transcranial magnetic stimulation / A. Pascuale-Leone, N.J. Davy, J.C. Rothwell, E.M. Wassermann, B.K. Purri. – London: Arnold, 2002. – 401 p. 4. Загальна фізіотерапія: навчальний посібник / Я.Р. Федорів, А.Л. Філіпюк, Р.Ю. Грицко. – К.: Здоров'я, 2004. – 224 с. 5. Акулова Л.П. Основные принципы адаптации организма к космогеофизическим факторам / Л.П. Акулова // Біофізика, 1998. – Т. 43. – С. 571-575. 6. Пат. 57131 Україна, МПК A61B 5/0402. Персональний телемедичний пристрій для стимуляції та корекції функціонального стану пацієнта / Корсунов А.Р., заявник і патентовласник Українська інж.-пед. академія. – № у 2010 09380, заявл. 26.07.2010, опубл.10.02.2011. Бюл. №3. 7. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю.П. Зайченко. – К.: Слово, 2008. – 344 с. 8. Корсунов А.Р. Аналого-цифрові регулятори електричного сигналу в каналах зв'язку: Монографія / А.Р. Корсунов. – УПА-Горлівка: "Видавництво Ліхтар", 2009. – 160 с. 9. Корсунов А.Р. Сочетанная электрическая стимуляция биологических структур организма по каналам телекоммуникационной системы / А.Р. Корсунов // Электроника и связь. – 2008. – № 6. – С. 42-48. 10. Корсунов А.Р. Метод оценки электрической активности проводящих путей при возбуждении тканевых структур биообъектов / А.Р. Корсунов // Электроника и связь. – 2007. – № 4. – С. 68-73.

References:

1. Hallet, M. (2005), "Magnetic stimulation in clinical neurophysiology". Ed. Elsivier, Vol. 2, pp. 38-46.
2. Mills, K.R. (1999), *Magnetic stimulation of the human nervous system*, University Press. Oxford, 647 p.
3. Pascuale-Leone, A., Davy, N.J., Rothwell, J.C., Wassermann, E.M., Purri, B.K. (2002). *Handbook of trans cranial magnetic stimulation*, Arnold. London, 401 p.
4. Fedoriv, Y.A., Filpyuk, A.L., Grytsko R.Y. (2004), *General physiotherapy: a tutorial*. Health, Kiev, 224 p.
5. Akulova, L.P. (1998), "Basic principles of adapt in to the factors cosmogeophysichal", *Biophysics*, Vol. 43, pp. 571-575.
6. Patent Ukraine, No. 57131, MPK A61B 5/0402, Korsunov, A.R. (2011), Personal telemedicine device for stimulation and correction of the function and correction of functional state of patients. The applicant and the patentee Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy No. u2091009380, announced 26.07.2010, published 10.02.2011. Bul. No. 3.
7. Zaychenko, Y.P. (2008), *Fuzzy models and techniques in intelligent systems*. Word, Kiev, 344 p.
8. Korsunov, A.R. (2009), *Analog-to-digital signal controllers of the electrical signal in the communication channels*, Monograph. Publisher Likhtar, UIPA-Gorlovka, 160 p.

9. Korsunov, A.R. (2008)."Combined electrical stimulation of the biological structures of the body through the channels of telecommunication systems". *Electronics & Communication*, No. 6, pp. 42-48.

10. Korsunov A.R. (2007)."Evolution method of electrical activity of path ways in the excitation of the tissue structures of biological objects", *Electronics & Communication*, No. 4, pp. 68-73.

Поступила (received) 29.03.2016

Статью представил д-р техн. наук, проф. УППА Канюк Г.І.

Korsunov Anatoliy, Dr. Tech. Sci., Docent
Ukraine ingen.-pedagog. Academy
Str. Universitetskaia, 16, Kharkiv, Ukraine, 61003
Tel.: (057) 733-79-41, e-mail: Korsunov_ar@mail.ru
ORCID ID:0000-0009-4538-83C1

УДК 621.394.4.:615.472.03

Технологія електромагнітної активізації тканинних структур організму / Корсунов А.Р. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 41 – 46.

В статті розглянуто рішення проблеми підвищення якості терапії в сеансах електромагнітного впливу за рахунок підвищення точності локалізації променю впливу на обраній області опромінення, зниження рівня паразитного впливу на сусідні структури організму та системи захисту від дестабілізуючих факторів, що в цілому забезпечується системою управління якістю терапевтичних послуг. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: якість терапії, електромагнітний вплив, структури організму, точність локалізації променю впливу.

УДК 621.394.4.:615.472.03

Технология электромагнитной активизации тканевых структур организма / Корсунов А.Р. // Весник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 41 – 46.

В статье рассмотрено решение проблемы повышения качества терапии в сеансах электромагнитного влияния за счет повышения точности локализации луча воздействия на избранной области облучения, снижении уровня паразитного воздействия на соседние структуры организма и системы защиты от дестабилизирующих факторов, что в целом обеспечивается системой управления качеством терапевтических услуг. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: качество терапии, электромагнитное воздействие, структуры организма, точность локализации луча воздействия.

UDC 621.394.4.:615.472.03

Technologi of electromagnetic make more active tissue structures of organism / Korsunov A.R. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – №. 21 (1193). – P. 41 – 46

In the article the solution improve the quality of therapy sessions electromagnetic interference by increasing the accuracy of the localization accuracy influence beam of radiation exposure on the selected area, reducing the parasitic effects on adjacent structures of the body and protect the system against destabilizing factors, which generally ensures the quality management system of therapeutic services. Refs.: 10 titles.

Keywords: quality of therapeutics, electromagnetic interference, the body structure, localization accuracy influence beam.

В.В. ЛИТВИН, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НУ "ЛП", Львів,
Д.І. УГРИН, канд. техн. наук, доц., зав. каф., ЧФ НТУ "ХПІ",
Чернівці

МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ТУРИСТИЧНИХ МАРШРУТІВ АЛГОРІТМАМИ НАСЛІДУВАННЯ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ

У статті подано методику вирішення завдань пошуку оптимальних маршрутів туризму. Здійснено формальний математичний опис задачі проектування маршрутної туристичної мережі. На основі проведеного аналізу чисельних методів їх вирішення зроблено висновок, що одним з найбільш перспективних на сьогоднішній день є метод оптимізації наслідуванням мурашиної колонії. На прикладі показано, як в алгоритми вирішення прикладних дискретних задач оптимізації впровадити складові самоорганізації мурах. Іл.: 2. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: пошук оптимальних маршрутів туризму, метод оптимізації наслідуванням мурашиної колонії, чисельний метод.

Постановка проблеми. Розвиток туристичних маршрутів визначається взаємозв'язком зростання міських та регіональних територій, чисельності населення, планування та розміщення різних туристичних функціональних зон. Рівень розвитку туристичних подорожей залежить від організації і технічних можливостей транспортних систем. Створення ефективної транспортної системи міста та міжрегіональних сполучень – це складна комплексна проблема України, що включає ряд завдань, різних за значимістю, складності і трудомісткості, серед яких визначення маршрутів руху транспорту до туристичних місць, обґрунтування типу, виду і кількості рухомого складу по кожному маршруту, розподіл маршрутів по перевізникам, розробка розкладу і оптимізація режимів руху на маршруті і таке інше.

Формування маршрутної мережі туризму є важливим етапом розробки ефективної транспортної системи для туристичної галузі. Від того, наскільки раціонально розроблена маршрутна мережа, наскільки вдало і гармонійно вона інтегрована в транспортну мережу відвідування туристичних осередків, залежать задоволення туристів перевезеннями і ефективність роботи туристичних компаній.

Під маршрутною мережею туризму розуміють сукупність всіх маршрутів руху туристичного транспорту на території міста, району, регіону, міжрегіональних сполучень тощо. Маршрут руху, у свою чергу, являє собою шлях руху транспортного засобу між початковим і кінцевим пунктами зупинок відповідно до розкладу.

Аналіз літератури. У нашій країні питаннями розвитку

маршрутного транспорту і шляхів почали цікавитися ще в кінці XIX століття. Одні з перших робіт в даній області належать Полякову А.А. та Ларіонову В.С. [1, 2]. Підводячи підсумок робіт того періоду, можна зробити висновок, що основна увага дослідників приділена формуванню комплексу вимог, що пред'являються до маршрутних схем. Методи побудови маршрутів руху і рекомендації щодо формування маршрутних мереж у роботах того періоду розглянуті поверхнево, сформульовані лише загальні положення щодо їх проектування. Однак уже тоді, автори сформулювали припущення, що для задоволення потреб міського населення в перевезеннях, формування мережі маршрутів повинно відбуватися на основі даних про фактичні переміщення населення по території міста чи між населеними пунктами, тобто матриці пасажирських кореспонденцій. Також в роботах того періоду вперше сформульовані критерії оптимізації міських маршрутних мереж, серед яких – найкоротший шлях між початковим і кінцевим пунктом маршруту, мінімальний час, що витрачається на переміщення усіма пасажирами і т.д.

У середині ХХ століття з розвитком економіко-математичних методів почався новий етап у формуванні наукових знань про функціонування систем пасажирського транспорту. Найбільш відомими авторами цього періоду є Яворський В.В. і Ольховський С.Ю. та ін. [3 – 5].

На основі аналізу робіт багатьох дослідників запропонована узагальнююча методика формування раціональної маршрутної мережі сполучень туризму (рис. 1), що дозволяє практично повністю задовольнити потреби людей в туристичних поїздках. Застосування такої методики для великого міста, регіону чи держави з щільною туристичною динамікою дозволить організувати ефективну маршрутну систему, що згладжує транспортні проблеми дорожньої комунікації.

Всі існуючі підходи для проектування раціональних маршрутних мереж пасажирського транспорту для туризму можна розділити на три групи:

1. Автоматизоване проектування маршрутів пасажирського транспорту туризму на основі формалізованих математичних моделей.
2. Часткова автоматизація процесу побудови маршрутів пасажирського транспорту туризму і експертна оцінка результатів фахівцем.
3. Прийняття рішень на основі досвіду і неформалізованого аналізу експертів.



Рис. 1. Методика проектування маршрутної мережі туризму

Одним з методів вирішення завдань пошуку оптимальних маршрутів на графах є алгоритм оптимізації наслідуванням мурашиної колонії, інакше мурашиний алгоритм (англ. Ant Colony Optimization, ACO). Автором ідеї є Марко Доріго [8]. Суть підходу полягає у використанні моделі поведінки мурах, що шукають шлях від колонії до джерела їжі, і являє собою метаевристичну оптимізацію. Колонія мурах може розглядатися як багатоагентна система, в якій кожен агент (мурашка) функціонує автономно за дуже простим правилом. На противагу майже примітивної поведінки агентів, поведінка всієї системи виходить злагодженою. На сьогодні вже відомі результати мурашиної оптимізації таких складних комбінаторних задач, як: задачі комівояжера для задання оптимізації маршрутів вантажівок, завдань розмальовки графа, квадратичної задачі про призначення, оптимізації мережевих графіків, задання календарного планування та інших [9 – 14]. Незважаючи на стрімкі успіхи мурашиних алгоритмів, переважна більшість фахівців по дослідженю операцій не знайомі з цією технологією оптимізації.

У реальному світі, мурахи (спочатку) ходять у випадковому порядку і по знаходженню продовольства повертаються у свою колонію. Мурахи використовують два способи передачі інформації: прямий – обмін їжею, мандибулярний, візуальний і хімічний контакти та непрямий – стігмержі (stigmergy). Стігмержі – це рознесений в часі тип взаємодії, коли один суб'єкт взаємодії змінює деяку частину навколошнього середовища, а решта використовують інформацію про її стан пізніше, тобто, коли знаходяться в її околиці. Біологічно стігмержі здійснюються через феромон (pheromone) – спеціальний секрет, що відкладається як слід при переміщенні мурашки. Феромон – досить стійка речовина. Він може сприйматися мурахами кілька діб. Чим вище концентрація феромону на стежці, тим більше мурах буде по ній рухатися. Якщо інші мурахи знаходять такі стежки, вони, найімовірніше, підуть по ним. Замість того, щоб відстежувати ланцюжок, вони зміцнюють її при поверненні, якщо в кінцевому підсумку знаходять джерело живлення. З часом феромон випаровується, що дозволяє мурахам адаптувати свою поведінку під зміни зовнішнього середовища. Чим більше часу потрібно для проходження шляху до мети і назад, тим сильніше випарується феромонна стежка. На короткому шляху, для порівняння, проходження буде більш швидким і як наслідок, щільність феромонів залишається високою. Випаровування феромонів також має властивість пошуку шляхів до локально-оптимального рішення. Якби феромони не випаровувалися, то шлях, обраний першим, був би найпривабливішим. У цьому випадку, дослідження просторових рішень були б обмеженими. Таким чином, коли одна мураха знаходить, наприклад, короткий шлях

від колонії до джерела їжі, інші мурахи, швидше за все підуть цим шляхом, і позитивні відгуки в кінцевому підсумку призводять всіх мурах до одного, найкоротшого шляху.

Мурашині алгоритми ґрунтуються на імітації природних механізмів самоорганізації мурах, використання яких ілюструється далі в статті на прикладі оптимізації маршруту комівояжера. Як основа поведінки колонії мурах самоорганізація являється множиною динамічних механізмів, що забезпечують досягнення системою глобальної мети в результаті низькорівневої взаємодії її елементів. Принциповою особливістю такої взаємодії є використання елементами системи тільки локальної інформації. При цьому виключається будь-яке централізоване управління і звернення до глобального образу, що репрезентує систему в зовнішньому світі.

Самоорганізація являється результатом взаємодії наступних чотирьох компонентів:

1. Випадковість.
2. Багаторазовість.
3. Позитивний зворотний зв'язок.
4. Негативний зворотний зв'язок.

Мета статті – розробка методики вирішення завдань пошуку оптимальних маршрутів туризму алгоритмами оптимізації наслідуванням мурашеної колонії.

Дослідження маршрутизації транспорту туризму. Застосування жорстко формалізованих математичних моделей дає оптимальне рішення з точки зору строго закладеного в програму алгоритму, однак при такому підході неможливо врахувати сформовані в регіоні традиції і звички пасажирів, переміщення, екологічне становище і інші вимоги, що не піддаються формальному опису. Тому найбільш ефективним вважається другий підхід, при якому експерт проводить аналіз отриманих результатів і приймає остаточне рішення.

Основою всього проектування є визначення величини пасажиропотоків за напрямами транспортних кореспонденцій. У свою чергу вони визначаються на основі транспортних розрахункових районів. Чим правильніше туристична територія розділена на транспортні райони, тим правильніше (точніше) величини пасажиропотоків і, тим самим, найбільшою мірою маршрутна мережа пасажирського транспорту відповідає потребам туриста.

Для вирішення завдання проектування маршрутних мереж транспорту туризму необхідно подати її у вигляді математичної моделі.

Транспортну мережу туризму описемо у вигляді орієнтованого графа $G(V,E)$, де V – множина вершин (пункти туристичних зупинок), E –

множина дуг мережі (реальної ділянки дороги, що зв'язує зупинкові туристичні пункти). Напрямок дуги визначає хід проходження автотранспорту. Магістралі з двостороннім рухом відповідно мають парні протилежно орієнтовані дуги.

При дослідженні потокоутворюючих факторів в множині вершин V виділимо дві підмножини: перша $S \subseteq V$, що містить пункти, які породжують потоки, які є елементами множини S . Їх назовемо джерелами. Другу підмножину $D \subseteq V$, яка містить пункти, що поглинають потоки, назовемо підмножиною стоків. Стосовно задачі моделювання потоків для зимніх періодів пікового відпочинку у горах, джерелами є міста і інші населені пункти, а стоками – для прикладу, туристичні райони карпатського регіону. Множину всіх потокоутворюючих пар представимо у вигляді декартового добутку $W = \{w = (i, j) : i \in S, j \in D\}$.

Кожній парі "джерело-стік" $w = (i, j) \in W$ відповідає свій попит на перевезення, ρ_W – загальний обсяг користувачів, які з пункту i повинні прибути в пункт j . А набір $\{\rho_w : w \in W\}$ називається матрицею кореспонденцій.

Шляхом (маршрутом) в мережі G , що з'єднує вершини i та j , назовемо послідовність дуг:

$$f_1 = (i \rightarrow k_1), f_2 = (k_1 \rightarrow k_2), \dots, f_l = (k_{l-1} \rightarrow k_l), f_{l+1} = (k_l \rightarrow j),$$

де $f_t \in F$ при всіх $t = 1, \dots, l+1$.

Передбачається відсутність петель і циклів в маршрутах. Позначимо через P_W – множину альтернативних маршрутів, слідуючи яким для кожної пари $w = (i, j) \in W$, що виходить із джерела i потік досягає стоку j . Сукупність усіх шляхів у мережі G позначимо через $P = \prod_{w \in W} P_w$.

Нехай x_p – це величина потоку, що йде по шляху $p \in P$. Традиційно для транспортних задач потокові змінні повинні бути невід'ємними і задовольняти балансовим обмеженням. Тому для кожної пари w потоки x_p , де $p \in P$, повинні належати множині

$$X_W = \left\{ x_p \geq 0 : p \in P_W, \sum_{p \in P_W} x_p = \rho_W \right\}.$$

Об'єднаємо величини x_p у вектор $x = (x_p : p \in P)$. Тоді допустимою областю для вектора x є множина, яка утворена як декартовий добуток всіх X_W :

$$X = \prod_{w \in W} X_W = \left\{ x \geq 0 : \sum_{p \in P_W} x_p = \rho_w, w \in W \right\}. \quad (1)$$

Подолання кожного з шляхів $p \in P$ супроводжується деякими витратами (час, паливо, гроші, амортизація автомобіля, зношеність дороги і т.п.). Кількісна характеристика таких витрат залежить від інтенсивності і щільноті руху в мережі. Як правило, в моделях розглядаються часові або фінансові витрати. Позначимо через G_p – питомі витрати користувачів на проїзд по шляху p . Оскільки на витрати по одному маршруту можуть впливати завантаження інших шляхів, то в загальному випадку G_p являють собою функції від завантаження всієї мережі, тобто $G_p = G_p(x)$.

Рішення подібних транспортних завдань часто зводиться до вирішення варіаційних нерівностей, а в окремому випадку оптимізаційної задачі, що дозволяє адаптувати чисельні методи для їх рішення.

В даний час відомо досить багато методів вирішення задачі маршрутизації транспорту. Завдання маршрутизації транспорту є узагальненням відомої задачі комівояжера, при якому необхідно побудувати відразу кілька замкнутих маршрутів, що проходять через деяку загальну вершину (депо). Ці завдання відносяться до класу задач комбінаторної оптимізації та є NP-складними. Методів знаходження їх точних рішень і перевірки наближених на оптимальність за кінцевий час не існує.

Існує точний алгоритм для вирішення завдання маршрутизації транспорту на основі методу гілок і границь, але в силу швидкого зростання часу обчислень його неможливо застосовувати для задач з більш ніж 25 – 30 вершинами.

Останнім часом найбільший інтерес проявляється до наближених алгоритмів. На початку 60-х років ХХ століття активний розвиток отримали евристичні методи, а в наші дні їх називають класичними. В останні двадцять років основні зусилля були спрямовані на розвиток так званих метаевристичних методів [6, 7]. Ці методи не є закінченими евристиками, готовими для практичного застосування. Вони представляють собою деякий метод для побудови закінченої евристики для конкретного завдання.

Більшість цих методів засновані на спостереженнях за живою і неживою природою. Їх відмінна риса полягає в здатності подолання точки локального оптимуму для продовження пошуку. Тому потенційно

в порівнянні з класичними евристиками метаевристичні методи здатні знаходити більш якісні рішення.

Формулювання узагальненого мурашиного алгоритму. Будь-який мурашиний алгоритм, незалежно від модифікацій, сформулюємо в наступному вигляді (рис. 2):

Поки умови виходу не виконані:

- створюємо мурах;
- шукаємо рішення;
- оновлюємо феромон;
- додаткові дії {опціонально}.

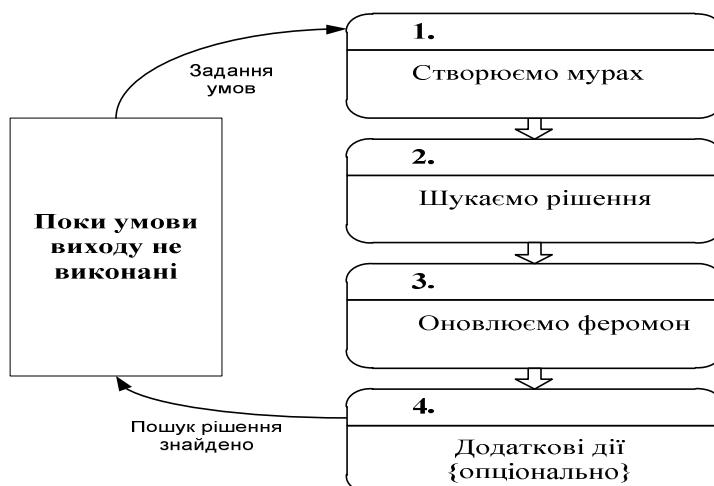


Рис. 2. Формулювання узагальненого мурашиного алгоритму

Для того, щоб побудувати відповідний мурашиний алгоритм для вирішення будь-якої задачі, потрібно:

1. Подати задачу у вигляді набору компонент і переходів або набором неорієнтованих зважених графів, на яких мурахи можуть будувати рішення.
2. Визначити значення сліду феромону.
3. Визначити евристику поведінки мурашки, коли будуємо рішення.
4. Якщо можливо, то реалізувати ефективний локальний пошук.
5. Вибрati специфічний алгоритм і застосувати для розв'язання задачі.
6. Налаштувати параметр алгоритму.

Також визначальними є: 1) кількість мурах; 2) баланс між вивченням і використанням; 3) поєднання з жадібними евристиками або локальним пошуком; 4) момент, коли оновлюється феромон.

Застосування мурашиних алгоритмів для туристичних задач. Завдання формулюється як задача пошуку мінімального за вартістю замкнутого маршруту по всіх вершинах без повторень на повному зваженому графі з n вершинами. Змістово вершини графа є містами, які повинен відвідати турист, а ваги ребер відображають відстані (довжини) або вартості проїзду. Ця задача є NP-складною, і точний переборний алгоритм її рішення має факторіальну складність.

Моделювання поведінки мурах пов'язано з розподілом феромону на стежці – ребрі графа. При цьому ймовірність включення ребра в маршрут окремого мураха пропорційна кількості феромону на цьому ребрі, а кількість відкладеного феромону є пропорційною довжині маршруту. Чим коротше маршрут, тим більше феромону буде відкладено на його ребрах, а отже, більша кількість мурах буде включати його в синтез власних маршрутів. Моделювання такого підходу використовує тільки позитивний зворотний зв'язок, що призводить до передчасної збіжності – більшість мурашок рухається за локально-оптимальним маршрутом. Уникнути цього можна, моделюючи негативний зворотний зв'язок у вигляді випаровування феромону.

Опишемо локальні правила поведінки мурах при виборі шляху:

1. Мурахи мають власну "пам'ять". Оскільки кожне місто може бути відвідане тільки один раз, то у кожного мурашки є список вже відвіданих міст – список заборон. Позначимо через $J_{i,k}$ список міст, які необхідно відвідати мурасі k , що знаходиться в місті i .

2. Мурахи володіють "зором" – видимість є евристичним бажанням відвідати місто j , якщо мураха знаходиться в місті i . Будемо вважати, що видимість є оберненопропорційна відстані між містами $\eta_{ij} = \frac{1}{D_{ij}}$.

3. Мурахи володіють "нюхом" – вони можуть вловлювати слід феромону, що підтверджує бажання відвідати місто j з міста i на підставі досвіду інших мурах. Кількість феромону на ребрі (i,j) в момент часу t позначимо через $\tau_{ij}(t)$.

4. На основі цього ми можемо сформулювати імовірнісно-пропорційне правило, що визначає ймовірність переходу k -го мурашки з міста i в місто j :

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, & j \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & j \notin J_{i,k}, \end{cases}$$

де α , β – це параметри, що задають ваги сліду феромону. При $\alpha=0$ алгоритм вироджується до жадібного алгоритму (буде обране найближче місто). Зауважимо, що вибір міста є імовірнісним, а правило 1 лише визначає ширину зони міста j ; у загальній зоні всіх міст задається випадкове число, яке і визначає вибір мурашки. Правило 1 не змінюється в ході алгоритму, але у двох різних мурах значення ймовірності переходу будуть відрізнятися, тому що вони мають різний список дозволених міст.

5. Пройшовши ребро (i, j) , мураха відкладає на ньому деяку кількість феромону, яка повинна бути пов'язаною з оптимальністю зробленого вибору. Нехай $T_k(t)$ є маршрут, пройдений мурахою k до моменту часу t , $L_k(t)$ – довжина цього маршруту, а Q – параметр, що має значення порядку довжини оптимального шляху. Тоді кількість феромону, що відкладається, може бути задана у вигляді

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & (i, j) \in T_k(t); \\ 0, & (i, j) \notin T_k(t). \end{cases}$$

Правила зовнішнього середовища визначають, в першу чергу, випаровування феромону. Нехай $p \in [0, 1]$ є коефіцієнтом випаровування, тоді правило випаровування має вигляд

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t); \quad \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t),$$

де m – кількість мурах в колонії.

На початку алгоритму кількість феромону на ребрах приймається рівною невеликому додатному числу. Загальна кількість мурах залишається постійною і рівною кількості міст, а кожен мураха починає маршрут зі свого міста.

Додаткова модифікація алгоритму може складатися у веденні так званих "елітних" мурах, які підсилюють ребра найкращого маршруту, знайденого з початку роботи алгоритму. Позначимо через T^* найкращий поточний маршрут, через L^* – його довжину. Тоді, якщо в колонії є e елітних мурах, то ребра маршруту отримають додаткову кількість феромону

$$\Delta\tau_e = e \cdot \frac{Q}{L^*}.$$

Складність даного алгоритму, як нескладно помітити, залежить від часу життя колонії t_{\max} , кількості міст (n) і кількості мурах в колонії (m).

Найважливішою складовою транспортної інфраструктури проведення туристичних поїздок, які багато в чому визначають динаміку розвитку сучасних регіонів, є маршрутна система пасажирського транспорту. У процесі розвитку туристичного регіону його маршрутна система потребує періодичного перегляду. Це може бути пов'язано з численними поточними змінами у забудові туристичних баз і санаторійів, зміною розташування місць прокладання туристичних маршрутів, модернізацією вулично-дорожньої мережі туристичних територій.

Перепроектування маршрутної мережі транспорту повітряним, водним чи наземним методом до привабливих туристичних осередків (або розробка нової раціональної маршрутної мережі) є трудомістким процесом, що включає кілька етапів роботи. Найбільш ефективним підходом вирішення даного завдання є її автоматизація з допомогою експерта, який проводить аналіз отриманих результатів і приймає остаточне рішення. Однак автоматизація завдань даної галузі вимагає проведення наукових досліджень з метою їх формалізації та розробки алгоритмів, придатних для використання на практиці.

Висновки. У результаті виконаної роботи розроблено методику розв'язання задач пошуку оптимальних туристичних маршрутів алгоритмами (наслідування) мурашиних колоній. Крім того, на прикладі показано, як в алгоритми вирішення дискретних задач оптимізації впровадити складові самоорганізації мурах. У перспективі планується застосувати використання мурашиних алгоритмів для розв'язування задачі комівояжера великої розмірності в туристичній галузі.

Список літератури: 1. Жеронимус Б.Л. Математико-статистический метод выборочного обследования пасажиропотоков / Б.Л. Жеронимус, Д.Д. Джумаев. – Автомобильный транспорт. – 1966. – № 4. – С. 43-44. 2. Блатнов М.Д. Пасажирские автомобильные перевозки // М.Д. Блатнов – М.: Транспорт, 1981. – 222 с. 3. Дли М.И. Алгоритмы поддержки принятия решений по управлению инфраструктурными проектами на основе моделей муравьиных колоний / М.И. Дли, В.В. Гимаров, С.И. Глушко // Вестник СГТУ. – 2012. – № 1 (64). – Вып. 2. – С. 423-427. 4. Глушко С.И. Многоколониальные алгоритмы муравьиных колоний для решения двухкритериальной задачи выбора маршрута / С.И. Глушко // Информационные технологии, энергетика и экономика: Сб. тр. X Междунар. Науч.-техн. конф. – Смоленск: Универсум., – 2013. – Т. 2. – С. 25-28. 5. Ольховский С.Ю. Моделирование функционирования и развития маршрутанизированных систем городского пасажирского транспорта: монография / С.Ю. Ольховский, В.В. Яворский. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – 138 с. 6. Мартинова Ю.А. Анализ опыта проектирования рациональных маршрутных сетей городского пасажирского транспорта / Ю.А. Мартинова // Интернет-журнал "Науковедения". – 2014. – № 2. – С. 121-131. 7. Goss S. Self-organized shortcuts in the Argentine ant / S. Goss, S. Aron, J.L. Deneuborg // Naturwissenschaften. – 1989. – Vol. 76. – P. 579-581. 8. Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithm / M. Dorigo – Ph.D.

thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992. **9.** Dorigo M. Th. Stutzle, Ant Colony Optimization, / M. Dorigo. – 2004. – Massachusetts Institute of Technology. – 306 p. **10.** Bonabeau E. Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems / E. Bonabeau, M. Dorigo. – Oxford University Press, 1999. – 307 p. **11.** Corne D. New Ideas in Optimization / D. Corne, M. Dorigo, F. Glover. – McGrawHill, 1999. – 450 p. **12.** Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization / M. Dorigo // Reader for CEU Summer University Course "Complex System". – Budapest, Central European University, 2001. – P. 1-38. **13.** Штоба С.Д. Муравьиные алгоритмы / С.Д. Штоба // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70-75. **14.** МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов / Дж.МакКоннелл. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с. **15.** Duhamel C. A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem / C. Duhamel, P. Lacomme, A. Quilliot, H. Toussaint // Computers & Operations Research. – 2011. – V. 38. – № 3. – P. 617-640. **16.** Adamidis P. An evolutionary algorithm for a real vehicle routing problem / P. Adamidis, C. Voliotis, E. Pliatsika // Int. Journal of Business Science and Applied Management. – 2012. – V. 3. – № 7. – P. 33-41.

References:

1. Geronimus, B.L. and Dzhumaev, D.D. (1966), "Mathematical-statistical method sample survey of passenger volumes", *Road transport*. No. 4, pp. 43-44.
2. Blatnov, M.D. (1981), *Passenger road transport*. Transport. Moskov, 222 p.
3. Dli, M.I., Gimarov, V.V. and Glushko, S.I. (2012), "Algorithms of support of decision-making on management of infrastructure projects on the basis of models of ant colonies", *Vesnik SGTU*, Vol. 1 (64). Release 2, pp. 423-427.
4. Glushko, S.I. (2013), "Multicolonial algorithms of ant colonies for the solution of a two-criteria problem of the choice of a route", *Information technologies, power and economy: X International. Sci. – Tehn. Conf.* Vol. 2, Universum. Smolensk, pp. 25-28.
5. Olkhovskiy, S.Yu. and Yavorskiy, V.V. (2001), *Modelling functioning and development mashrutizirovanih urban passenger transport systems*: monograph, Publishing house, SibADI, Omsk, 138 p.
6. Martynova, Yu.A. (2014), "Analysis of design experience of rational route networks urban passenger transport", *Internet magazine "Science of Science"*. No. 2, pp. 121-131.
7. Goss S., Aron, S. and Deneuborg, J.L. (1989). "Self-organized shortcuts in the Argentine ant", *Naturwissenschaften*, Vol. 76, pp. 579-581.
8. Dorigo, M. (1992), *Optimization, learning and natural algorithm*, Ph.D. thesis, Politecnico di Milano, Italy, pp. 45-57.
9. Dorigo, M. and Stutzle, Th. (2004), *Ant Colony Optimization*. Massachusetts Institute of Technology, 306 p.
10. Bonabeau, E. and Dorigo, M. (1999), *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press. 307 p.
11. Corne, D., Dorigo, M. and Glover, F. (1999), *New Ideas in Optimization*. McGrawHill, 450 p.
12. Dorigo, M. (2001), Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization, Reader for CEU Summer University Course "Complex System", Central European University, Budapest, pp. 1–38.
13. Shtobva, S.D. (2003), "Ant algoritmy", *Exponenta Pro. Mathematics in Applications*, No. 4, pp.70-75.
14. MakKonnell, Dzh. (2004), *Fundamentals of modern algorithms*, Tehnosfera, Moskov, 368 p.
15. Duhamel, C., Lacomme, P., Quilliot, A. and Toussaint, H. (2011), "A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, pp. 617-640.

- 16.** Adamidis, P., Voliotis, C. and Pliatsika, E. (2012), "Ant evolutionary algorithm for a real vehicle routing problem". *Int. Journal of Business Science and Applied Management*, Vol. 3, pp. 33-41.

Надійшла (received) 01.03.2016

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

Vasyl Lytvyn, Dr. Tech. Sci., Professor
Department of Information Systems and Networks
National University "Lviv Polytechnic"
Str. Bandery, 12 S., Lviv, Ukraine, 79013
Tel.: +38032-582-538, E-mail: yevhen.v.burov@lpnu.ua
ORCID: 0000-0002-9676-0180

Dmytro Ugryn, Cand. Tech. Sci.
Department of Information Systems
National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute
Str. Holovna, 203A ,Chernivtsi, Ukraine, 58000
Tel.: + 38050-989-1546, E-mail: ugrind@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4858-4511

УДК 004.652.4+004.827

Методика вирішення завдань пошуку оптимальних туристичних маршрутів алгоритмами наслідуванням мурашиної колонії / Литвин В.В., Угрин Д. І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 47 – 60.

У статті подано методику вирішення завдань пошуку оптимальних маршрутів туризму. Здійснено формальний математичний опис задачі проектування маршрутної туристичної мережі. На основі проведеного аналізу чисельних методів їх вирішення зроблено висновок, що одним з найбільш перспективних на сьогоднішній день є метод оптимізації наслідуванням мурашиної колонії. На прикладі завдання комівояжера показано, як в алгоритми вирішення дискретних задач оптимізації впровадити складові самоорганізації мурах. Іл.: 2. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: пошук оптимальних маршрутів туризму, метод оптимізації наслідуванням мурашиної колонії, чисельний метод.

УДК 004.652.4 + 004.827

Методика решения задач поиска оптимальных туристических маршрутов алгоритмами подражания муравьиной колонии / Литвин В.В., Угрин Д. И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 47 – 60.

В статье представлена методика решения задач поиска оптимальных маршрутов туризма. Осуществлено формальное математическое описание задачи проектирования маршрутной туристической сети и на основе проведенного анализа численных методов их решения сделан вывод, что одним из наиболее перспективных на сегодняшний день является метод оптимизации подражанием муравьиной колонии. На примере задачи коммивояжера показано, как в алгоритмы решения дискретных задач оптимизации внедрить составляющие самоорганизации муравьев. Ил.: 2. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: поиск оптимальных маршрутов туризма, метод оптимизации подражанием муравьиной колонии, численный метод.

UDC 004.652.4 + 004.827

Methods of solving search algorithms optimal travel routes imitation ant colony / Lytvyn V.V., Ugryn D.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 47 – 60.

In the article modeling techniques meet the challenges of finding optimal routes of tourism. Done formal mathematical description of the problem of designing a tourist route network and, based on the analysis of numerical methods for solving them concluded that one of the most promising to date is a method of optimizing imitation ant colony. For example, the traveling salesman problem shows how in algorithms for solving optimization problems of discrete components to implement self ants. Figs.: 2. Refs.: 16 titles.

Keywords: search optimal routes of tourism, optimization method imitation ant colony, numerical method.

Н.В. МАТЮШЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",

А.В. ФЕДЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",

И.Б. ШЕЛИХОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

**ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ
НОВИКОВА С ДВУМЯ ЛИНИЯМИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ,
НАРЕЗАЕМЫХ МЕТОДОМ ОБКАТКИ**

В статье разработана методика определения наличия интерференции для цилиндрических передач Новикова с двумя линиями зацепления. Базируется она на нахождении интерферируемой зоны. Нарезание колес производится единым реечным инструментом методом обкатки. Геометрия активных профилей зуба колеса и шестерни определяет необходимые и достаточные условия наличия интерференции в передаче. Ил.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: цилиндрическая передача, передача Новикова, две линии зацепления, интерференция, метод обкатки.

Постановка проблемы. Одной из важнейших составных частей большинства современных машин является привод, включающий зубчатые передачи. Являясь одними из наиболее распространенных видов механических передач, они во многом предопределяют габариты, вес, передаваемую мощность, а также ряд других показателей, от которых зависят эксплуатационные свойства и экономическая эффективность создаваемых машин. Именно этим можно объяснить то, что и ранее, и теперь ведутся упорные исследования по совершенствованию существующих и по созданию новых систем зацепления, особенно с повышенной нагрузочной способностью. Эти исследования показали [1], что уже только за счет изменения геометрии зацепления можно добиться значительного улучшения условий работы зубчатой передачи, повысить ее нагрузочную способность, а следовательно, увеличить срок службы при сохранении прочих равных условий. Эвольвентное зацепление было разработано с почти исчерпывающей полнотой. Однако, несмотря на общепризнанные преимущества, этот вид зацепления, базирующийся на принципе взаимоогибающих поверхностей, имеет и существенные недостатки и не может полностью удовлетворить требованиям современной техники. Эта причина побудила многих исследователей [2] заняться поиском новых систем зацепления. Некоторые из этих систем были плоскими, имеющими лишь торцевое перекрытие зубьев.

Кардинально решить задачу повышения нагрузочной способности зубчатых передач удалось М.Л. Новикову, который создал геометрическую теорию точечного зацепления для зубчатых передач с

параллельными, пересекающимися и скрещивающимися осями. Огромным преимуществом зацепления Новикова явилось то, что оно базируется на контактных линиях [2], не требует взаимоогибания в плоскости, перпендикулярной линии зацепления, что неизмеримо расширяет возможности выбора сопряженных поверхностей зубьев.

В настоящее время зубчатые передачи с зацеплением Новикова находят все более широкое применение в самых различных отраслях машиностроения – от редукторов общего назначения до передач турбинного типа. С их применением удалось решить ряд сложных задач при конструировании и повышении технического уровня современных машин. Однако потенциальные возможности передач Новикова используются еще далеко не полностью, что сдерживается прежде всего, несовершенством технологии изготовления и контроля. Более того, ряду геометрических характеристик зацепления до сих пор дается разная трактовка, нет четких рекомендаций по выбору исходного контура [3], коэффициента перекрытия дозаполюсного варианта, не отработана методика проверки на отсутствие интерференции.

Анализ литературы. Как отмечалось ранее, при образовании сопряженных поверхностей по методу М.Л. Новикова в отличие от метода огибания допускается использование в качестве сопряженных таких поверхностей, которые пересекаются между собой (интерферируют). Требуется лишь одно: чтобы их пересечение происходило за пределами рабочих участков поверхностей. Вследствие этого [4], считается, что существенное значение имеет проверка принятых сопряженных поверхностей на интерференцию. Для этого необходимо найти форму и положение линий пересечения и выяснить, не проходят ли они по рабочим участкам сопряженных поверхностей.

В работах [4, 5], вопрос об интерференции поверхностей для случаев передач с параллельными осями рекомендуется решать графически или графо-аналитическим путем построения линии пересечения сопряженных поверхностей с помощью секущих плоскостей, перпендикулярных осям вращения колес, т.е. сводить задачу к определению линий пересечения торцовых профилей зубьев, перемещающихся в плоскости поперечного сечения с заданными угловыми скоростями. Показано, что такой переход приносит желаемый результат для зубьев, профиль которых в торцовой плоскости очерчен дугой окружности. Разработки в указанном направлении в предположении, что торцевый профиль отличен от окружности практически отсутствуют. Если учесть, что для реальных передач появление интерференции рабочих поверхностей может явиться следствием погрешностей изготовления и монтажа, а также деформации

зубьев, то становится очевидным, что и предложенные в [6] рекомендации не могут дать ответа на рассматриваемый вопрос.

В своих исследованиях В.Н. Севрюк остановился примерно на такой же методике. Отличительной ее особенностью явилось лишь то, что графическим построениям было дано строгое аналитическое описание. В работе [4] вопросу интерференции сопряженных поверхностей зубьев передач Новикова уделяется внимание с позиции более общего подхода. Рассматривается метод исключения интерференции поверхностей, образованных семейством огибающих циклических аксоидов. При этом, как образующая поверхность, так и огибающая, являются винтовыми обобщенными поверхностями с различными винтовыми параметрами. Каждый аксойд, входящий в семейство, представляет собой винтовую циклическую поверхность, образованную сферами переменного радиуса. В работе [7] подчеркивается, что образование циклических аксоидов семействами сфер, имеющих сечения в виде окружностей, открывает перспективу исключения интерференции обобщенных сопряженных поверхностей семействами аксоидов.

Вообще, исследованию интерференции сопряженных поверхностей зубьев передач Новикова посвящено очень мало работ. Этот факт, как нам кажется, можно объяснить лишь тем, что эта проблема весьма сложна с математической точки зрения. К этому выводу приходят и авторы [5]. Однако в промышленности часто приходится наблюдать наличие заедания поверхностей зубьев особенно при малых числах последних и больших углах наклона линии зуба. Поэтому, наличие большого количества исходных контуров и значительное отличие геометрии зуба зубчатого колеса, нарезаемого методом обкатки, от исходного контура, а также наличие упругих деформаций зубьев, погрешностей изготовления и монтажа, делают проблему интерференции зубьев еще более актуальной и еще более сложной.

Цель статьи. Разработать алгоритм, позволяющий по заданным параметрам исходного контура фрезы и начальным параметрам передачи, то есть модулю зацепления, количеству зубьев шестерни и колеса, углу наклона зубьев, определить наличие интерференции для цилиндрических передач Новикова с двумя линиями зацепления, нарезанных методом обкатки.

Решение проблемы. Точечное зацепление может быть осуществлено различными профилями зубьев, лишь бы в пределах рабочих участков отсутствовала их интерференция. Так как при одном и том же исходном контуре ни дугой окружности, ни дугой эвольвенты не

описывается торцовый профиль зуба, возникает необходимость проверки проектируемой передачи на отсутствие интерференции.

Выбираем произвольную пару зубьев, которые будут сопрягаться в процессе зацепления шестерни и колеса. Определим понятие интерферирующей зоны, как множество точек пересечения данной пары зубьев, которые хотя бы для одного из них являются внутренними в фиксированный момент времени. Пусть M – точка интерферирующей зоны. Следовательно, M – общая точка двух тел зубьев. Проведем через M плоскость Σ , перпендикулярную осям вращения. Пусть Σ_1 и Σ_2 – сечения плоскостью Σ рассматриваемых зуба шестерни и зуба колеса соответственно. Точка M принадлежит пересечению Σ_1 и Σ_2 . Верно и обратное утверждение: если профили Σ_1 и Σ_2 пересекаются, то существует точка M , которая принадлежит интерферирующей зоне. Плоскость Σ параллельна данной фиксированной торцовой плоскости, поэтому наличие точки $M \in \Sigma$ означает, что в какой-то момент времени торцовые профили данной сопряженной пары зубьев колеса и шестерни пересекутся. По длине зуба остаются неизменными формы и размеры торцовых сечений зуба колеса и зуба шестерни, т.е. процесс обкатки аналогичен во всякой, параллельной выбранной торцовой плоскости, следовательно, требовать отсутствия интерференции в любом торцовом сечении колесо – шестерня излишне. То есть, для отсутствия интерференции в зацеплении колесо-шестерня необходимо и достаточно, чтобы в любой момент времени их торцовые профили не пересекались по всей ширине зубчатого венца. Заметим, что в процессе обкатки два профиля касаются друг друга в точках линии зацепления. Поэтому условие касания, а не пересечения существенно.

Алгоритм определения интерференции состоит в следующем. Производим нарезание колес единым реечным инструментом. На рис. 1 показаны независимые процессы нарезания торцовых профилей зуба в момент, когда в станочном зацеплении находятся номинальные точки контакта профиля ножки колеса \bar{N}_{fs1} (W_{fs1} – мгновенный центр относительного движения), и в момент (рис. 2) зацепления точки \bar{N}_{as2} – номинальной точкой контакта профиля головки шестерни (W_{as2} при этом является точкой касания торцовой проекцией начальной прямой ($H\Pi_s$) и начальной окружности). Здесь и ниже элементы с индексом 2 принадлежат колесу, а элементы с индексом 1 – шестерне. С колесом и шестерней жестко связаны прямоугольные декартовы системы координат (с.к.) $x_1O_1y_1$ и $x_2O_2y_2$, у которых O_2 – центр торцового сечения колеса, O_1 – центр торцового сечения шестерни, ось y_1 содержит отрезок $[O_1W_{fs1}]$, а ось y_2 – отрезок $[O_2W_{as2}]$.

W_{fs1} – мгновенный центр относительного движения в момент зацепления фрезы с \bar{N}_{fs1} , W_{as2} – мгновенный центр относительного движения в момент контакта профиля фрезы с \bar{N}_{as2} .

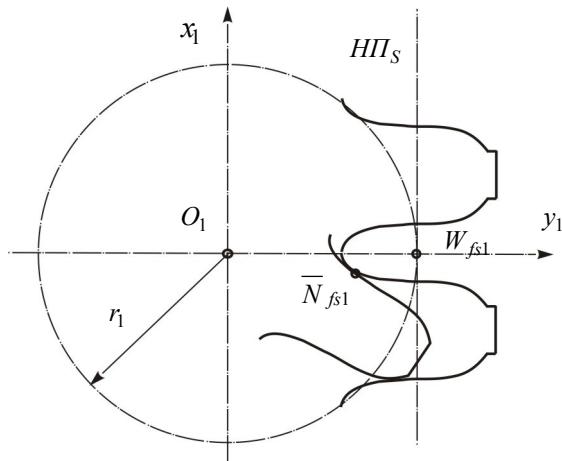


Рис. 1. Зацепление фрезы и шестерни

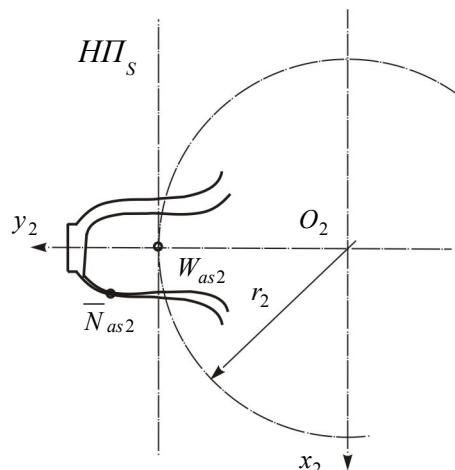


Рис. 2. Зацепление фрезы и колеса

На рис. 3 показана модель сопряжения торцевых профилей данного зуба колеса и данного зуба шестерни в момент контакта \bar{N}_{fs1} и \bar{N}_{as2} . Как показано ранее [2], угол обката зависит от полярного угла на торцовом аналоге исходного контура (IK_s). В частности, согласно с

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mu & \sin \mu \\ -\sin \mu & \cos \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{cases} C = \frac{\rho_a}{\cos \beta} R \cos \alpha_s - r \mu + \frac{l_a}{\cos \beta}, \\ D = \rho_a R \sin \alpha_s \pm x_a + r, \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\cos \beta}{r} (\pm x_a \operatorname{ctg} \alpha_s) + \frac{l_a}{r \cos \beta} + \frac{\rho_a \sin^2 \beta}{r \cos \beta} \cos \alpha_s. \quad (3)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \mu^{***} = \mu_{as} &= \pm \frac{x_a}{r \operatorname{tg} \alpha_k} + \\ &+ \frac{l_a + \rho_a \sin^2 \beta \cos(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \alpha_k \cos \beta))}{r \cos \beta}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu^{**} = \mu_{fs} &= \frac{x_f}{r \operatorname{tg} \alpha_k} - \\ &- \frac{l_f + \frac{\pi m_n}{2} - \rho_f \sin^2 \beta \cos(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \alpha_k \cos \beta))}{r \cos \beta}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\rho_a, \rho_f, l_a, l_f, x_a, x_f, \alpha_s, \alpha_k$ – параметры исходного контура согласно ГОСТ 15023-76 [8]; R – радиус колеса; r – радиус шестерни; β – угол наклона зуба.

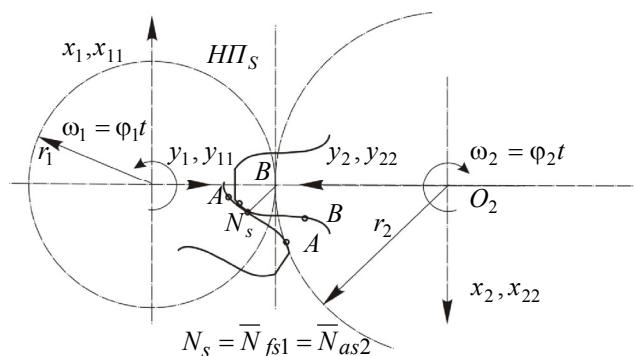


Рис. 3. Зацепление шестерни и колеса

При $r = r_1$ имеем тот угол μ^{***} (4), на который необходимо повернуть $HPII_S$, чтобы номинальная точка контакта профиля головки

зуба шестерни вошла в контакт с соответствующей ей точкой инструментальной рейки. В этом положении $H\Pi_S$ точка W_{fs1} – точка пересечения нормали, проведенной к дуге эллипса IK_S через номинальную точку контакта на ножке зуба инструментальной рейки – является искомым мгновенным центром относительного движения инструментальной рейки и заготовки.

Ранее системой (1) с учетом (2) и (3) при $r = r_1$ записывалось уравнение торцового профиля головки зуба шестерни в системе координат $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$. Связь между системами координат $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$ записывается в виде

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mu^{***} & -\sin \mu^{***} \\ \sin \mu^{***} & \cos \mu^{***} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Подставляем (1) в (6). В итоге получаем уравнение торцового профиля головки зуба шестерни в с.к. $x_1O_1y_1$:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mu^{***} & -\sin \mu^{***} \\ \sin \mu^{***} & \cos \mu^{***} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \mu(\alpha_s) \sin \mu(\alpha_s) \\ -\sin \mu(\alpha_s) \cos \mu(\alpha_s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Аналогично проводя рассуждения, находим взаимосвязь системы координат $x_2O_2y_2$ и xOy (здесь $O_2 = O$ – центр начальной окружности):

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mu^{**} & -\sin \mu^{**} \\ \sin \mu^{**} & \cos \mu^{**} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \mu(\alpha_s) \sin \mu(\alpha_s) \\ -\sin \mu(\alpha_s) \cos \mu(\alpha_s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Естественно полагать, что прямые O_1x_1 и O_1y_1 задают одну и ту же плоскость, что и прямые O_2x_2 и O_2y_2 .

При этом с.к. $x_1O_1y_1$ и $x_2O_2y_2$ взаимосвязаны следующим матричным равенством:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ [O_1O_2] \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $[O_1 O_2] = r_1 + r_2 = a_w$ – межосевое расстояние.

В рассмотренной схеме наряду с неподвижными с.к. $x_1O_1y_1$ и $x_2O_2y_2$ введем подвижные с.к. $x_{11}O_1y_{11}$ и $x_{22}O_2y_{22}$, связанные с профилями зуба и колеса и шестерни соответственно. В момент контакта \bar{N}_{fs1} с \bar{N}_{as2} система координат $x_{11}O_1y_{11}$ совпадает с с.к. $x_1O_1y_1$, а система координат

$x_{22}O_2y_{22}$ с $x_2O_2y_2$. Этот момент считаем началом отсчета угла поворота φ_1 шестерни относительно неподвижной с.к. $x_1O_1y_1$. Пусть $\varphi_2 = u\varphi_1$ – угол поворота второго колеса, где u – передаточное отношение ($u < 0$). Тогда матричные равенства

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ y_{11} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{22} \\ y_{22} \end{pmatrix} \quad (11)$$

показывают взаимосвязь с.к. $x_1O_1y_1$ с $x_{11}O_1y_{11}$ и $x_2O_2y_2$ с $x_{22}O_2y_{22}$.

Уравнение торцового профиля головки зуба шестерни (7) перепишем в виде

$$\begin{pmatrix} x_{11} \\ y_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Подставив в (9) выражение (11), а затем (9) в (12), преобразуя, получим в координатном виде:

$$\begin{cases} x_{11} = -\cos(\varphi_1 - u\varphi_1)x_{22} + \sin(\varphi_1 - u\varphi_1)y_{22}, \\ y_{11} = -\sin(\varphi_1 - u\varphi_1)x_{22} - \cos(\varphi_1 - u\varphi_1)y_{22} + a_w. \end{cases} \quad (13)$$

Для дальнейшего изложения примем понятие активного профиля зуба колеса как сочетание двух активных участков профиля ножки и головки зуба. Ниже для краткости будем называть профилем зуба колеса его активный профиль, так как в решении вопроса об интерференции существенной роли нерабочий участок (переходная кривая между профилями головки и ножки зуба колеса) не играет.

Для нахождения интерференции выше получены уравнения участков профилей AA зуба колеса (8) и BB зуба шестерни (7), как функции от параметров ИК и полярного угла α_s , который берется на ИК_s специальным образом. Сейчас же покажем, как с использованием этих формул решать задачу о нахождении пересечения профилей, т.е. задачу о наличии интерференции. С этой целью запишем параметрический вид участка AA в с.к. $x_{11}O_1y_{11}$ и соответственно участка BB в с.к. $x_2O_2y_2$:

$$\begin{cases} x_{11} = f_{11}(\alpha_s), \\ y_{11} = f_{12}(\alpha_s), \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_{22} = f_{21}(\alpha_s), \\ y_{22} = f_{22}(\alpha_s). \end{cases} \quad (15)$$

Согласно (15), запишем (13) в с.к. $x_{11}O_1y_{11}$

$$\begin{cases} x_{11} = -\cos(\varphi_1 - u\varphi_1)f_{21}(\alpha_s) + \sin(\varphi_1 - u\varphi_1)f_{22}(\alpha_s), \\ y_{11} = -\sin(\varphi_1 - u\varphi_1)f_{21}(\alpha_s) - \cos(\varphi_1 - u\varphi_1)f_{22}(\alpha_s) + a_w. \end{cases}$$

Или, для краткости,

$$\begin{cases} x_{11} = \bar{f}_{21}(\alpha_s), \\ y_{11} = \bar{f}_{22}(\alpha_s). \end{cases} \quad (16)$$

Тогда в с.к. $x_{11}O_1y_{11}$ мы будем иметь (рис. 4) неподвижный участок AA , согласно (14) и подвижный участок BB (с изменением φ_1) согласно (16).

Участок AA профиля зуба первого колеса представляет собой функцию, т.е. каждому значению оси абсцисс соответствует единственная ордината. Аналогичный случай можно наблюдать и с участком BB . При каких-то двух текущих углах φ_1 AA и BB будут касаться (в частности, $\varphi_1 = 0$ соответствует этому случаю). Если же существует такой поворот φ_1^k первого колеса, когда AA и BB пересекаются, то часть BB будет находиться "ниже", чем соответствующее по равным аргументам подмножество точек множества AA (рис. 4).

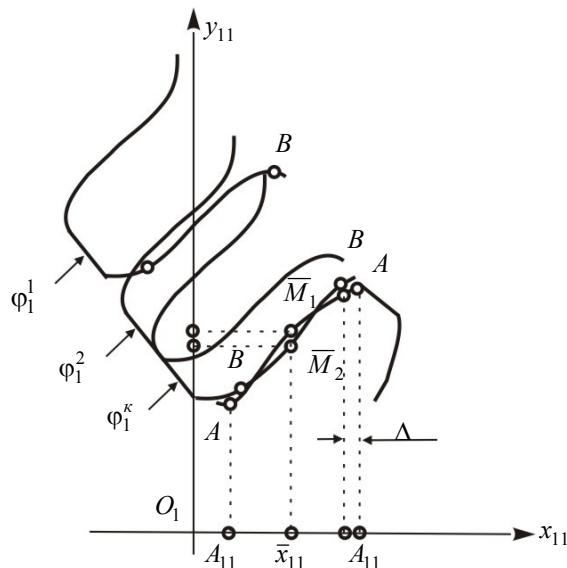


Рис. 4. Геометрическая интерпретация метода обкатки

Например, точки \bar{M}_2 и \bar{M}_1 имеют одинаковый аргумент \bar{x}_{11} , но ордината \bar{M}_2 меньше, чем у \bar{M}_1 , т.е. \bar{M}_2 находится "ниже" \bar{M}_1 . В

соответствии с этим строим алгоритм определения пересечения профилей.

По заданному уравнению (14) дуги AA профиля зуба шестерни находим отрезок $[A_{11}A_{11}]$ оси абсцисс, как проекцию дуги AA на O_1x_{11} . На нем с шагом Δ отмечаем узловые точки x_{11}^i

$$x_{11}^i = x_{11}^0 + \Delta_i,$$

где

$$i = 0, \dots, \left\lceil \frac{[A_{11}A_{11}]}{\Delta} \right\rceil, \quad (17)$$

$\left\lceil \frac{[A_{11}A_{11}]}{\Delta} \right\rceil$ – целая часть числа $\frac{[A_{11}A_{11}]}{\Delta}$.

По x_{11}^i согласно (14) находим ординату y_{11}^i (на AA)

$$y_{11}^i (\text{на } AA) = f_{12}(f_{11}^{-1}(x_{11}^i)),$$

$$\alpha_s^i = f_{12}(f_{11}^{-1}(x_{11}^i)).$$

Находим численно с использованием метода половинного деления применительно к уравнению $x_{11} = f_{11}(\alpha_s)$ системы (14).

Рассмотрим дискретный угол поворота φ_1 колеса

$$\varphi_1^j = \varphi_1^0 + \delta j,$$

где $\varphi_1^0 = -\frac{\pi}{2}$, δ – угол поворота (в радианах); $j = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ (n –

определяется согласно условию $\varphi_1^n = \frac{\pi}{z}$).

Диапазон изменения угла поворота $\varphi_1 \in \left[-\frac{\pi}{z}; \frac{\pi}{z} \right]$ достаточен, так как вне этих границ заданная пара торцевых профилей (зуба шестерни и зуба колеса) не пересекаются даже теоретически.

По x_{11}^i согласно (16) находим ординату y_{11}^i (на BB)

$$y_{11}^i (\text{на } BB) = f_{22}(f_{21}^{-1}(x_{11}^i)),$$

где

$$\alpha_s^i = \bar{f}_{21}^{-1}(x_{11}^i),$$

находим аналогично численно с использованием метода половинного деления применительно к уравнению $x_{11} = f_{21}(\alpha_s)$ системы (14).

Тогда, необходимое и достаточное условие наличия интерференции в цилиндрических передачах Новикова ДЛЗ выражается строгим неравенством

$$y_{11}^i(\text{на } BB) < y_{11}^i(\text{на } AA),$$

где i – определяется по (17).

Выводы. Разработан алгоритм, позволяющий по заданным параметрам исходного контура фрезы и начальным параметрам определить наличие интерференции для цилиндрических передач Новикова с двумя линиями зацепления, нарезанных методом обкатки.

Список литературы: 1. Ou Z., Seireg A. Analysis and Synthesis of Arc Gears by Interactive Graphics / J. of Mechanisms, Transmission and Automation in Design. – 2004. – Vol. 108. – P. 65-71. 2. Syzrantsev V.N. Contact load and endurance of cylindrical gearing with arch-shaped teeth / V.N. Syzrantsev, K.V. Syzrantseva, M.R. Varshavsky / Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. 5–9 April 2010. – Chongqing, China. – P. 425-43. 3. Малый Д.В. Численный синтез рационального исходного контура для передач Новикова с арочными зубьями. Сравнительный анализ / Д.В. Малый // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 8 (66). – С. 105-109. 4. Ерихов М.Л. Интерференция (подрезание) в передачах, образованных по методу огибания с двумя параметрами / М.Л. Ерихов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1966. – № 7. – С. 5-9. 5. Краснощеков Н.Н. Теория зацепления Новикова / Н.Н. Краснощеков, Р.В. Федякин, В.А. Чесноков / М.: Наука. – 1976. – 173 с. 6. Севрюк В.Н. Теория круговинтовых поверхностей в проектировании передач Новикова / В.Н. Севрюк. – Харьков, ХГУ, 1972 – 168 с. 6. Матюшенко Н.В. Арочные зубья с циклоидальной продольной формой / Н.В. Матюшенко, В.А. Бережной, А.В. Федченко // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. научн. трудов. Серия. "Проблемы механического привода". – Харьков, 2013. – № 40. – С. 75–79. 8. ГОСТ 15023-76. Передачи Новикова цилиндрические с двумя линиями зацепления. Исходный контур / Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 3 с.

References:

1. Ou, Z. and Seireg, A. (2004), "Analysis and Synthesis of Arc Gears by Interactive Graphics", *J. of Mechanisms, Transmission and Automation in Design*, Vol. 108, pp. 65-71.
2. Syzrantsev, V.N., Syzrantseva, K.V. and Varshavsky, M.R. (2010), "Contact load and endurance of cylindrical gearing with arch-shaped teeth", *Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions, 5–9 April, 2010, Chongqing, China*, pp. 42-43.
3. Malyiy, D.V. (2003), "Numerical synthesis of the rational source circuit for gearings with arched teeth. Comparative analysis", *Visnik SNU Im. V. Dalya, Luhansk*, Vol. 8 (66), pp. 105-109.
4. Erihov, M.L. (1966), "Interference (undercutting) in the gears formed by the method of diffraction with two parameters", *Proceedings of the Universities. Engineering*, Vol. 7, pp. 5-9.
5. Krasnoschekov, N.N., Fedyakin, R.V. and Chesnokov, V.A. (1976), *Theory of gearing Novikov*, Science, Moscow, 173 p.
6. Sevryuk, V.N. (1972), *The theory circles screw surfaces in the design of gear Novikov*, Kharkov State University, Kharkov, 168 p.
7. Matyushenko, N.V., Berezhnoy, V.A. and Fedchenko, A.V. (2013), "Arched teeth with cycloidal longitudinal form" *Vestnik NTU "ХПИ" Coll. scientific. works. Series. "Mechanical Drive Problems."*, Kharkov, Vol. 40, pp.75-79.

8. GOST 15023-76, (1978) Transfer Novikov cylinder with two lines of engagement. Source circuit, The publishing house of standards , Moscow, 3 p.

Поступила (received) 12.03.2016

Статью представил д.т.н., проф. НТУ "ХПИ" Ткачук Н.А.

Matyushenko Nikolai, Cand. Tech. Sci.

Kharkiv National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002

Tel.: (057) 707-64-31, e-mail: priada@mail.ru

ORCID ID: 0000-0003-4727-8993

Fedchenko Hanna, Cand. Tech. Sci.

Kharkiv National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002

Tel.: (057) 707-64-31, e-mail: anna-fedchenko@mail.ru

ORCID ID: 0000-0003-0690-6017

Shelikhova Inessa, Cand. Tech. Sci.

Kharkiv National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002

Tel.: (057) 707-64-31, e-mail: inessa.shelikhova@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-5637-1850

УДК 621.833+515.2

Побудова алгоритму визначення інтерференції в циліндричних передачах Новікова з двома лініями зацеплення, що нарізають методом обкатки / Матюшенко М.В., Федченко Г.В., Шеліхова І.Б. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 61 – 73.

У статті розроблена методика визначення наявності інтерференції для циліндричних передач Новікова з двома лініями зацеплення. Базується вона на знаходженні інтерферіруемої зони. Нарізування коліс проводиться єдиним рейковим інструментом методом обкатки. Геометрія активних профілів зуба колеса і шестерні визначає необхідні і достатні умови наявності інтерференції в передачі. Іл.: 4. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: циліндрична передача, передача Новікова, дві лінії зацеплення, інтерференція, метод обкатки.

УДК 621.833+515.2

Построение алгоритма определения интерференции в цилиндрических передачах Новикова с двумя линиями зацепления, нарезаемых методом обкатки / Матюшенко Н.В., Федченко А.В., Шелихова И.Б. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 61 – 73.

В статье разработана методика определения наличия интерференции для цилиндрических передач Новикова с двумя линиями зацепления. Базируется она на нахождении интерферирующей зоны. Нарезание колес производится единым реечным инструментом методом обкатки. Геометрия активных профилей зуба колеса и шестерни определяет необходимые и достаточные условия наличия интерференции в передаче. Ил.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: цилиндрическая передача, передача Новикова, две линии зацепления, интерференция, метод обкатки.

UDC 621.833 +515.2

Construction algorithm for determining the interference of cylindrical Novikov gears meshing with two lines that were cut by running / Matyushenko N.V., Fedchenko A.V., Shelikhova I.B. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 61 – 73.

The paper developed a method of determining the presence of interference for cylindrical Novikov gears with two lines of engagement. It is based on finding the interfering area. Cutting wheels made one tool rack by running. The geometry of the active profile of the tooth wheel and gear determines the necessary and sufficient conditions for the existence of interference in the transmission. Figs.: 4. Refs.: 8 titles.

Keywords: spur gear , gear Novikova, two lines of engagement, interference, break-in method.

UDC 004.942

DOI: 10.20998/2411-0558.2016.21.08

V.D. PAVLENKO, dr. of techn. sciences, professor, ONPU, Odessa,

O.O. FOMIN, Cand. Tech. Sci., ONPU, Odessa,

A.N. FEDOROVA, MSC, ONPU, Odessa,

M.M. DOMBROVSKYI, PhD student, ONPU, Odessa

IDENTIFICATION OF HUMAN EYE-MOTOR SYSTEM BASE ON VOLTERRA MODEL

A new method of constructing nonparametric dynamic model of the human oculomotor system on the basis of experimental data "input-output". This takes into account nonlinear and inertial properties of the eye of the rectus muscles. A technology for tracking eye movement based on the videos. It is possible to determine the dynamic characteristics of the oculomotor system functions as a transition of the first and second order - integral transforms Volterra kernels. Refs: 14 titles.

Keywords: oculomotor apparatus, modeling, nonparametric dynamic models, Volterra kernels, multidimensional transient characteristics, eye-tracking technology.

Statement of the problem. Control technology based on tracing eye movements (eye-tracking) are starting to get more and more widespread [1, 2]. Traditional areas of implementation such decisions – is a medical (ophthalmology) diagnostics and vision correction [3, 4], building interfaces in information systems, control of complex technical objects, the process of physical training in the sport, etc. Increased interest in such innovation technologies experiencing today and commercial sector.

However, most systems based on technology eye-tracking, for the successful operation require new methods of mathematical description of human eye-motor system (EMS) and special equipment for experimental research [5–7].

For successful solution problems of management, control and diagnostics of technical and medical applications need to have effective methods for identifying human EMS. Without having adequate mathematical model of EMS, taking into account the individual human properties, it is impossible to create modern applications with an expanded set of personalized features, such as medical and athletic trainers, authorized access to data, testing of human-machine systems, and more. Increase of the control objects complexity while maintaining the dynamic properties of systems, increased requirements for accuracy and objectivity of decisions leads to the problem of the development of new intelligent computing systems. These systems will ensure required characteristics and automate the monitoring process for objects of different physical nature. Modern diagnostic systems include both new mathematical techniques and modern resources of intelligent computing

© V.D. Pavlenko, O.O. Fomin, A.N. Fedorova, M.M. Dombrovskyi, 2016

[1, 2].

The paper considers the traditional approach of tracking the rotation angles of the pupil's eye (horizontal and vertical) using video registration. This involves using video cameras to obtain images of the pupil in the dynamics at regular intervals, which would be clearly fixed position pupil's eye when it moves [1].

By means of digital processing and analysis of the sequence of frames static images and recognition the pupil position are restored to the coordinate's position pupil on the plane, namely, the values of the horizontal and vertical rotation angles of eye relative to the start position [2].

Significant disadvantage existing hardware, implementing this technology is fundamental impossibility of measuring dynamic and nonlinear characteristics of EMS, without that knowledge it's impossible to build an effective management system.

For elimination this disadvantage, the traditional structure of tracking system pupil's behavior using video recording in this work was further developed, which allowed not only perform static measuring the pupil's eye position, but also determining the dynamic characteristics of human visual system by the experimental observations "input-output" (identification problem) [8, 9].

Effectiveness of using modern methods of identification largely depends on the adequacy of mathematical models of real objects. As an information model of and natural objects considered as a "black box" used integral power Volterra series [10, 11] which in a compact form is characterized by nonlinear and inertial properties of the investigated object.

The purpose and research problems. The purpose of work is development method for constructing nonparametric dynamic model of eye-motor system, taking into account its inertial and nonlinear properties, based on experimental studies of "input-output" and also computational tools and software for the information technology processing experimental data.

To achieve this goal were set this following tasks:

- development methods for constructing nonlinear dynamic model of EMS as a Volterra kernels which characterizing both nonlinear and inertial properties of the nature objects;
- development information technology of obtaining experimental data for identification EMS based on pupil's movement tracking using video registration;
- development computational methods of identification multidimensional dynamic (transient) characteristics EMS using test inputs as a Heaviside functions of different amplitudes;
- verification constructed model EMS.

The Volterra model. Basis for creation of mathematical (informational) model of investigated object are the results of measurements of its input and output variables, and the solution of the problem associated with the identification of the experimental data and process them with the noise measurements.

To describe the objects of unknown structure appropriate to use the most universal nonlinear nonparametric dynamic models – Volterra model [10, 11]. The nonlinear and dynamic properties investigated object is uniquely described by a sequence of invariant with respect to the type of input signal is of multidimensional weight functions – Volterra kernels.

For continuous nonlinear dynamical system connection between the input $x(t)$ and output $y(t)$ signals with zero initial conditions can be represented by a series of Volterra

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \dots + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots, \quad (1)$$

where $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – Volterra kernel n -th order, function is symmetric with respect to real variables τ_1, \dots, τ_n ; $y_n(t)$ – the n -th partial component of response system (n -dimensional convolution integral); t – current time.

For nonlinear dynamical system multiple-input and multiple-output used multivariate Volterra series, which has the form:

$$y_j(t) = \sum_{i_1=1}^v \int_0^t w_{i_1}^j(\tau)x_{i_1}(t-\tau)d\tau + \sum_{i_1=1}^v \sum_{i_2=1}^v \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2}^j(\tau_1, \tau_2)x_{i_1}(t-\tau_1)x_{i_2}(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \dots + \sum_{i_1=1}^v \sum_{i_2=1}^v \sum_{i_3=1}^v \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2 i_3}^j(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x_{i_1}(t-\tau_1)x_{i_2}(t-\tau_2)x_{i_3}(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3. \quad (2)$$

where $y_j(t)$ – system response for the j -th output at the current time t for zero initial conditions; $w_{i_1 i_2 \dots i_n}^j(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – Volterra kernel n -th order in i_1, i_2, \dots, i_n inputs and j -th output ($j = 1, 2, \dots, \mu$), the functions symmetric with respect to real variables τ_1, \dots, τ_n ; $x_1(t), \dots, x_v(t)$ – input signals; v, μ – quantity of inputs and outputs, respectively.

In the context the problem stated above – identification EMS – need to use the model (2) for the mathematical description of the object [8]: two pair rectus muscles (input object) provide eye movement up and down, left and right, and various combinations (fig. 1); measured responses – the coordinates $u(t)$ and $v(t)$ current position the pupil relative to the initial position u_0 and v_0 (the outputs of the object). In this case in model (2) adopting $v = 2$ and $\mu = 2$.

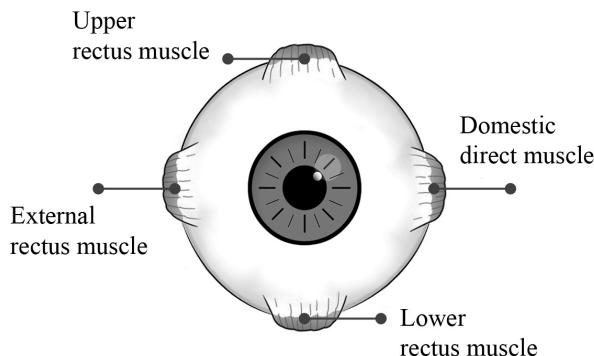


Figure 1. Direct eye muscles

In this paper to simplify the experiment and data identification, problem solved for the case horizontal pupil's movement ($v=1$ and $\mu=1$), i.e. based on the model (1).

Problem identification (model constructing) as (1) or (2) consist to determine the Volterra kernels based on experimental data "input-output" EMS. Construction of the model is the selection of test actions $x(t)$ and development of algorithm, which enables for the measured response $y(t)$ allocate partial components $y_n(t)$ and determined on the basis of their Volterra kernels $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$, $n = 1, 2, \dots$ [12].

Computing method of multidimensional transient functions for identification EMS. Taking into account specificity investigated object to identification used test multistage signals. If test signal $x(t)$ represents an identity function (Heaviside function) – $\theta(t)$, the result of identification the transition function of the first order $\hat{h}_1(t)$ and the diagonal section n -th order $\hat{h}_n(t, \dots, t)$.

To determine the sections subdiagonal transition functions n -th order ($n \geq 2$) EMS tested using the n step test signal with given amplitude and different intervals between signals. With appropriate processing responses get subdiagonal section n -dimensional transition functions $h_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n)$, which represent n -dimensional integral of Volterra kernel n -order $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$:

$$h_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty w_n(t - \tau_1 - \lambda_1, \dots, t - \tau_n - \lambda_n) d\lambda_1 \dots d\lambda_n. \quad (3)$$

Method for determination sections of n -dimensional transition functions based on the statement, proof of which is similar to that given in [15].

Statement. Let the test effect represents the sum of k ($k = 1, 2, \dots, n$) step signals $x_i(t) = a\theta(t - \tau_i)$ ($i = 1, 2, \dots, k$), with a time shift t on τ_1, \dots, τ_k ,

then, for EMS with a single-input and single-output assessment section of the transient response of n -th order:

$$\hat{h}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) = \frac{(-1)^n}{n! a^n} \sum_{\delta_1, \dots, \delta_n=0}^1 (-1)^{\sum_i \delta_i} y(t, \delta_1, \dots, \delta_n), \quad (4)$$

where $y_n(t, \delta_1, \dots, \delta_n)$ – response EMS, measured in time t , under the action at her multistage signal with amplitude a , and if $\delta_i = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$), then test action comprises a stepped shift signal for τ_i , otherwise, with $\delta_i = 0$ – it does not contain.

For example, to determine transient function second order, first EMS tested stepped signals with a time shift for τ_1 and τ_2

$$x_1(t) = a\theta(t - \tau_1) \text{ и } x_2(t) = a\theta(t - \tau_2), \quad (5)$$

measured appropriate responses $y_{10}(t) = y(t, 1, 0)$ and $y_{01}(t) = y(t, 0, 1)$, respectively. Then, applied to the input EMS two-stage signal

$$x(t) = a\theta(t - \tau_1) + a\theta(t - \tau_2), \quad (6)$$

and from the resulting response $y_{11}(t) = y(t, 1, 1)$ deducted responses to single step signals

$$y_{11}(t) - y_{10}(t) - y_{01}(t) = 2a^2 \hat{h}_2(t - \tau_1, t - \tau_2). \quad (7)$$

From (7), after normalization should be

$$\hat{h}_2(t - \tau_1, t - \tau_2) = \frac{1}{2a^2} [y_{11}(t) - y_{10}(t) - y_{01}(t)]. \quad (8)$$

With fixed values τ_1 and τ_2 assessment of the transient response second order $\hat{h}_2(t - \tau_1, t - \tau_2)$ is a function of the variable t – section of the surface $\hat{h}_2(t_1, t_2)$ plane, passing at an angle of 45 degrees to the axes t_1 and t_2 and were shifted in axis t_1 by the amount $\tau_0 = \tau_1 - \tau_2$. Changing value τ_0 , get different section $\hat{h}_2(t, t - \tau_0)$, on which you can restore all surface $\hat{h}_2(t_1, t_2)$. With $\tau_1 = \tau_2 = 0$, get the diagonal section $\hat{h}_2(t, t)$.

Information technology of obtaining experimental data for the EMS identification. The experiment was implemented with the help of the proposed system for tracking the behaviour of the pupil based on video recording is performed in the following sequence.

1. Head of the observed person is located in front of the recording device (camera) at the known distance.

2. On fixed intervals, the display shows a graphic test signal in the form of a bright spot (light spot). At the same time turn on video camera to record eye movement from the initial position to a position determined by the light spot (test signal).

3. After passing a series test signals an experiment is terminated. File with video recording of pupil's movement is stored in memory of the measuring system.

4. After finishing experiment, start the application, that realizing intelligent object detection algorithm (pupil) in the captured video. Plotted graph of changing position pupil of an input in the form of the test signal from the display (experiment "input-output").

5. Obtained data stored in the database and displays.

Software tools identification EMS. Developed software tools that perform automatic image recognition sites (pupil) in the sequence of frames of video recording and calculating coordinates. An important feature of this information technology is demanding of hardware. The experiment can be performed using a mobile phone equipped with a front-facing camera with a resolution of 5 Mpx, frequency of at least 30 frames per second and a processor with a clock speed of 1800 MHz for data processing (any modern smart phones).

In developing the software used the following information technologies: operating system for smartphones and tablet computers - Android 4; Library algorithms, computer vision, image processing and numerical algorithms for general purpose Open Source – library OpenCV (Open Source Computer Vision Library), which is ready to implementation under most existing operating systems (Android, Windows, Linux, iOS); graphics library Android open source – MPAndroidChart; Haar cascade and artificial neural network; programming language Java.

Training Haar detector. The main advantage of the detector of the Haar – speed. Thanks to the fast image processing, it becomes possible to process streaming video. Detector Haar implemented in the library OpenCV. The classifier is formed on the primitives of Haar by computing the characteristic values. For learning to the input of the first classifier is a set of "correct" images with pre-selected region of the image. Next, you iterate through entities and the calculation of the characteristic value. The computed values are saved in a file in format XML.

To search for the object in the image method of Viola-Jones. The method of Viola-Jones put: the integral image representation for the Haar features, building a classifier based on the adaptive busting algorithm and method for combining classifiers in a cascade structure. This allows you to search for the object in the image in real-time.

Results of identification – EMS transient function. Approbation tracking technology of the pupil's behavior based on video registration is performed on the task of analysis of work the oculomotor apparatus along the horizontal axis.

Where in the input (test) signal - distance from the base of the perpendicular, dropped from the center of pupil eye to the plane, in which is formed the perturbation – the light source to the point source (light spots) in the horizontal plane. Measure the response (the output) is a function of the current deviation of pupil in the frame image of the EMS from the starting point, depending on the time.

To determine the diagonal section of the transient response second order object is tested at first step signal with an amplitude of the a (horizontal distance to light spot from the starting point, represents the original position the pupil)

$$x_1(t) = a\theta(t) \quad (9)$$

and measured an appropriate response $y_1(t)$. Then, with zero initial conditions applied to the input signal from the object with doubled amplitude a

$$x_2(t) = 2a\theta(t), \quad (10)$$

and from thus obtained response $y_2(t)$ deducted doubled response $y_1(t)$. After normalization of this difference, we obtain

$$\hat{h}_2(t, t) \cong \frac{y_2(t) - 2y_1(t)}{2a^2}. \quad (11)$$

To determine the of the transient response of the first order, we obtain the expression

$$\hat{h}_1(t) \cong \frac{y_1(t)}{a}. \quad (12)$$

Measured response of the eye $y_1(t)$ and $y_2(t)$ to the input test signals $a\theta(t)$ and $2a\theta(t)$ shown in Fig.2, respectively.

Obtained graphs of EMS transient functions first $\hat{h}_1(t)$ and second order $\hat{h}_2(t, t)$ shown in Fig. 3 and 4, respectively.

Comparing response of the constructed model

$$\hat{y}(t) = a\hat{h}_1(t) + 2a^2\hat{h}_2(t, t) \quad (13)$$

with experimental data – response of object identification $y(t)$ – shown in fig. 5.

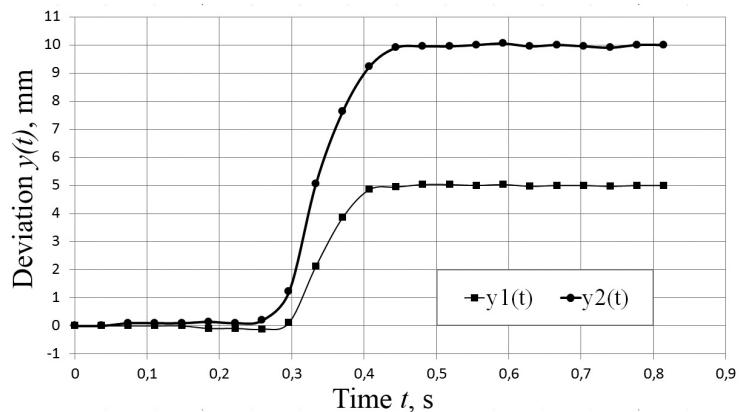


Figure 2. Object responses $y_1(t), y_2(t)$

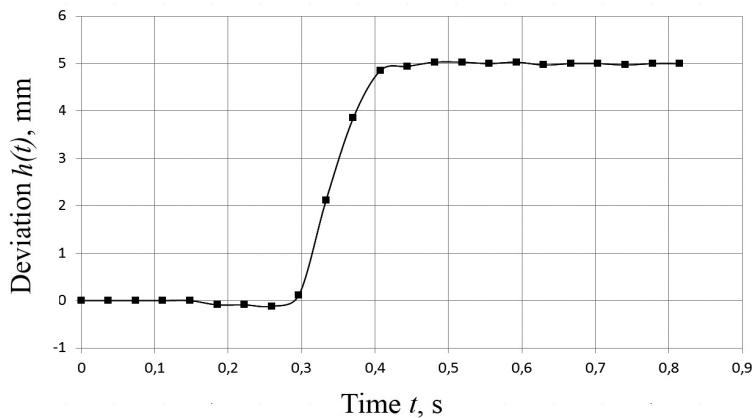


Figure 3. Transient functions first order $\hat{h}_1(t)$

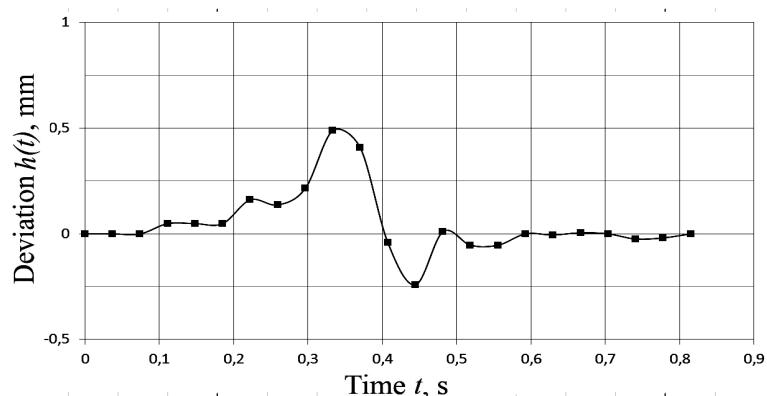


Figure 4. Transient functions second order $\hat{h}_2(t,t)$

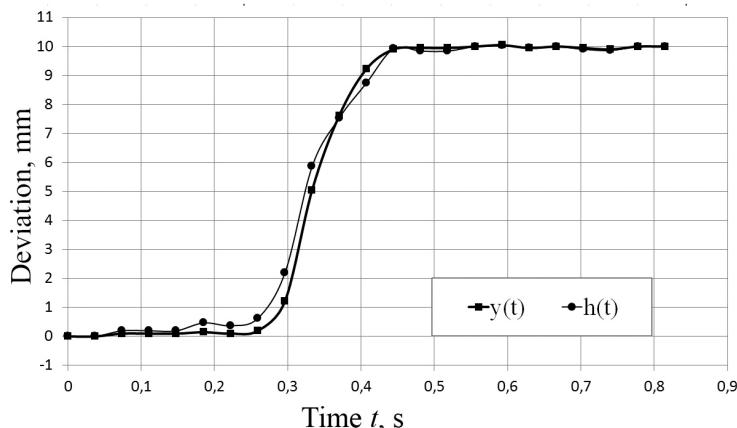


Figure 5. Comparison responses of the object $y(t)$ and model $\hat{y}(t)$

Provided graphs are practically the same (standard deviation $\sigma = 0,31$) which confirms effectiveness computational algorithm of identification and adequacy of the constructed model based on experimental data "input-output".

Conclusions. Proposed the method for constructing nonparametric dynamic models of human EMS taking into account its inertia and nonlinear properties based on the experimental data "input-output".

Has been further developed technology tracking the pupil's behavior with help of video recording that has allowed to determine eye's dynamic characteristics.

Proposed technology of tracking pupil's behavior does not need special equipment and laboratory experimental conditions and accessible for widespread use. Important feature of the technology is undemanding to the hardware, which opens up the possibility of its use in the modern mobile devices.

Verification of the developed model showed adequacy her under the investigation object – virtually identical (within acceptable error) responses of the object and model at the same impact test.

Obtained results identification of human's oculomotor system will be used in diagnostic tests as a source of primary data based on information technology, presented in [13, 14].

References:

1. Kepler, J., Linz, U. (2004), *Biomechanical Modelling of the Human Eye*. Netz Werk für Forschung, Lehre und Praxis, Linz, 231 p.
2. Guestrin, E.D., Eizenman, M. (2006), "General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 53 (6), pp. 1124-1133.
3. Kopaeva, V.G. (ed.) (2012), *Eye Diseases. Fundamentals of Ophthalmology*, Medicine, Moscow, 552 p.

4. Shamshinova, A.M., Volkov, V.V. (1999), *Functional Methods of Research in Ophthalmology*. GEOTAR-Media, 416 p.
5. Bazyan, B.H., Chigaleychik, L.A., Teslenko, E.L., Lachinova, D.R. (2007), "Using the Analysis of the Trajectories of Eye Movements, Head and Hands for Early Functional Diagnosis of Parkinson's Disease". *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, Vol. 143 (5), pp. 484-486.
6. Jansson, D., Medvedev, A. (2014), "Volterra Modeling of the Smooth Pursuit System with Application to Motor Symptoms Characterization in Parkinson's Disease". *European Control Conference (ECC)*, pp. 1856-1861.
7. Westwick, D.T. (1995), *Methods for the Identification of Multiple-Input Nonlinear Systems*. Departments of Electrical Engineering and Biomedical Engineering. McGill University, Montreal, Quebec, Canada, pp. 192-232.
8. Doyle, F.J., Pearson, R.K., Ogunnaike, B.A. (2001), *Identification and Control using Volterra Models*. Published Springer Technology & Industrial Arts, 314 p.
9. Sidorov, D.N. (2013). *Methods of Analysis of Integrated Dynamic Models: Theory and Applications*. ISU, Irkutsk, 293 p.
10. Boyd, S., Jang, Y.S., Chua, L.O. (1983), "Measuring Volterra Kernels". *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 30 (8), pp. 571-578.
11. Pavlenko, S.V., Pavlenko, V.D., Polozhaenko, S.A. (2012), "Identification Methods Nonlinear Systems on Base Volterra Models using Testing by Poly Pulses". *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, NTU "KhPI", Kharkov, No. 62 (968), pp. 155-161.
12. Pavlenko, V. (2009), "The Compensation Method for Identifying the Nonlinear Dynamic Systems in the Form of Volterra Kernels". *Proc. of the Odessa Polytechnical University Press*, No. 2 (32), pp. 121-129.
13. Pavlenko, V., Fomin, A. (2008), "Methods for Black-Box Diagnostics using Volterra Kernels". *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Inductive Modelling (ICIM'2008)*, Kyiv, Ukraine, pp. 104-107.
14. Pavlenko, V., Fomin, O., Ilyin, V. (2009), "Technology for Data Acquisition in Diagnosis Processes by Means of the Identification using Models Volterra". *Proc. of the 5th IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009)*, Rende (Cosenza), Italy, pp. 327-332.

Поступила в редакцию 13.05.2016

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

Pavlenko Vitaliy, Dr. Sci. Tech, Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel.: (048) 771-25-64, e-mail: pavlenko_vitalij@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Fomin Alexander, PhD, Associate Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel.: (048) 705-83-79, e-mail: aleksandr.fomin@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-8816-0652

Fedorova Anna, Master, Engineer-Programmer
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel.: (048) 705-83-79, e-mail: camomile763@gmail.com

Dombrovskyi Mikola, Postgraduate
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel.: (048) 705-85-79, e-mail: dombrovskiin@mail.ru

УДК 004.942

Ідентифікація окорухової системи людини на основі моделі Вольтерра
/ В.Д. Павленко, О.О. Фомін, Г.М. Федорова, М.М. Домбровський // Вісник
НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016.
– № 21 (1193). – С. 74 – 85.

Пропонується новий метод побудови непараметричної динамічної моделі окорухової системи людини на основі даних експерименту "вхід-виход". При цьому враховуються нелінійні і інерційні властивості прямих м'язів ока. Розроблено технологію відстеження руху ока на основі відеозапису. Це дозволило визначити динамічні характеристики окорухової системи у вигляді переходічних функцій першого і другого порядків – інтегральних перетворень ядер Вольтерра. Бібліогр.: 13 назв.

Ключевыe слова: окорухова система, ідентифікація, моделювання, непараметричні динамічні моделі, ядра Вольтерра, багатовимірні переходіні функції, технологія відстеження руху ока.

УДК 004.942

Идентификация глазодвигательной системы человека на основе модели Вольтерра / В.Д. Павленко, А.А. Фомин, А.Н. Федорова, Н.Н. Домбровский // Весник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 74 – 85.

Предлагается новый метод построения непараметрической динамической модели глазодвигательной системы человека на основе данных эксперимента "вход-выход". При этом учитываются нелинейные и инерционные свойства прямых мышц глаза. Разработана технология отслеживания движения глаза на основе видеозаписи. Это позволило определить динамические характеристики глазодвигательной системы в виде переходных функций первого и второго порядков – интегральных преобразований ядер Вольтерра. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: глазодвигательная система, идентификация, моделирование, непараметрические динамические модели, ядра Вольтерра, многомерные переходные функции, технология отслеживания движения глаза.

UDC 004.942

Identification of human eye-motor system base on Volterra model
/ V.D. Pavlenko, O.O. Fomin, A.N. Fedorova, M.M. Dombrovskyi // Herald of the
National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and
Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 74 – 85.

A new method of constructing nonparametric dynamic model of the human oculomotor system on the basis of experimental data "input-output". This takes into account nonlinear and inertial properties of the eye of the rectus muscles. A technology for tracking eye movement based on the videos. It is possible to determine the dynamic characteristics of the oculomotor system functions as a transition of the first and second order - integral transforms Volterra kernels. Refs: 14 titles.

Keywords: oculomotor apparatus, modeling, nonparametric dynamic models, Volterra kernels, multidimensional transient characteristics, eye-tracking technology.

B.B. ПАСІЧНИК, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", Львів,

T.B. ШЕСТАКЕВИЧ, ас., Національний університет "Львівська політехніка", Львів

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АНАЛІЗУ ДАНИХ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

Інформаційно-технологічна підтримка первого етапу інклюзивного навчання полягає у реалізації процесів накопичення результатів психофізіологічного діагностування особи, формуванні та аналізі комплексної оцінки особи. Формування моделі процесу аналізу накопичених результатів медичного та психологічного діагностування особи є етапом розроблення інформаційної технології підтримки процесу визначення психофізіологічних особливостей особи за допомогою інтелектуального та багатовимірного аналізу даних. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: інклюзивне навчання, психофізіологічне діагностування, модель процесу аналізу даних, комплексна оцінка особи.

Постановка проблеми. Сучасною реалізацією процесів ефективного навчання осіб, що мають особливі освітні потреби, є інклюзивне навчання, коли особа здобуває освіту та отримує корекційну підтримку у масових навчальних закладах. Забезпечення учасників процесу інклюзивного навчання (особа, що має особливі освітні потреби, її батьки, спеціалісти психолого-медико-педагогічних комісій, вчителі та фахівці інклюзивного навчання, роботодавці тощо) сучасними інформаційними технологіями та засобами дає змогу належним чином підтримати таке навчання та суттєво розширити доступ до нього. Розроблення методів та засобів для інформаційно-технологічного супроводу інклюзивного навчання є актуальним науково-прикладним завданням, розв'язання якого сприятиме більш повній та якісній інтеграції особи з особливими потребами у соціум.

Аналіз літератури. В моделі інформаційно-технологічного супроводу інклюзивного навчання, запропонованій у [1], на першому етапі розглядається процес визначення психофізіологічних особливостей особи на основі накопичених даних діагностування. Розроблення методів та засобів інформаційно-технологічного супроводу процесів інклюзивного навчання для забезпечення моніторингу та накопичення даних психофізичного розвитку особи передбачає розроблення схем відповідних баз даних, проектування сховища даних, розроблення методів інтелектуального (Data Mining) та багатовимірного аналізу даних (OLAP) для комплексної оцінки особи.

Застосування запропонованих у [2, 3] основних підходів до ведення

медичної документації, використання методів структурування та накопичення даних медичних досліджень для інформаційно-технологічного супроводу етапів інклюзивного навчання потребує розроблення схеми бази даних та моделі сховища даних для накопичення даних психофізіологічного діагностування. Процес аналізу даних, що накопичуються у сховищі, розглядаємо як такий, що складається із чотирьох підпроцесів – формування інформаційної моделі предметної області, попереднього опрацювання даних, виявлення залежностей, оцінювання та інтерпретації результатів аналізу [4]. Врахування особливостей інструментів інтелектуального аналізу під час проектування бази даних психофізіологічного діагностування та сховища даних комплексного оцінювання особи дає можливість більш точно подавати особливості даних, що накопичуються [5], передбачати можливість появи недосконаліх даних (неповних, нечітких, недетермінованих) та розробити методи їх ефективного опрацювання [4, 6]. Використання методів та засобів аналізу даних, реалізованих у [7 – 9], дає змогу досліджувати накопичені дані та виявляти приховані у них залежності, тим самим даючи підстави для удосконалення процесів психофізіологічного діагностування.

Мета роботи полягає у розробленні моделі аналізу даних комплексного оцінювання особи з урахуванням схеми сховища даних, у якому зберігаються результати психофізіологічного діагностування. Розроблені моделі є підґрунттям для розроблення архітектури інформаційної системи супроводу інклюзивного навчання та формування вимог до інформаційних технологій, що вдосконалюють процедури визначення психофізіологічних особливостей особи як одного із ключових етапів процесу інклюзивного навчання.

Основний розділ. Схема бази даних результатів психофізіологічного діагностування розроблена із урахуванням принципів роботи психолого-медико-педагогічних комісій (ПМПК) та ґрунтується на формі "Картки стану здоров'я і розвитку дитини", яка знаходитьться в МПМК та містить педагогічну характеристику особи, результати психологічного та логопедичного дослідження, основні медичні висновки.

Модель сховища даних подамо у вигляді

$$SD = \langle DB, RF, RM, rf, mf, func \rangle,$$

де DB – множина відношень, їх схем та обмежень, які містять інформацію із вхідної бази даних психолого-фізіологічного діагностування; RF – схема множини відношень фактів rf ; RM – схема множини відношень метаданих mf ; $func$ – множина процедур прийняття рішень [10]. Отримання нових рішень полягає у видобуванні даних зі

сховища шляхом реалізації відповідних функцій сховища даних на відношенні фактів із врахуванням вимог *usr_prm*, які висуваються до такого рішення: $Dc = func(rf, usr_prm)$. Множина вимог до пропонованого рішення залежить від потреб користувача-учасника процесу інклузивного навчання. Зв'язок між відношеннями *rf* та *DB* утворює гіперкуб даних, виміром якого є множина відношень бази даних результатів психофізіологічного тестування. Прикладом виміру комплексної оцінки особи можуть бути дані психологічного діагностування, згруповані для конкретної особи за датою. Реалізації операції зрізу у сформованому кубі даних вирішує завдання наступного аналізу даних, наприклад, отримувати інформацію про роботу психологів з метою аналізу їх завантаженості в певний період, досліджувати повноту наданих особі психологічних послуг тощо.

Описи даних, накопичених у сховищі комплексних оцінок, дають змогу моделювати процеси аналізу даних при визначені психофізичних характеристик особи. Зазначені методи інтелектуального та багатовимірного аналізу даних дає змогу виявляти закономірності у даних комплексної оцінки особи та фахово вирішувати задачу встановлення рівня психофізичного розвитку та прийнятності інклузивного навчання для особи з особливими потребами.

Модель процесу аналізу даних для визначення особливостей психофізичного розвитку особи побудовано у вигляді $M = (M_1, M_2, M_3, M_4)$ [4], де M_1 – підпроцес формування предметної області; M_2 – підпроцес попереднього опрацювання даних; M_3 – підпроцес виявлення залежностей; M_4 – підпроцес оцінювання та інтерпретації результатів аналізу.

Модель M_1 підпроцесу формування опису предметної області: $M_1 = (X, A, d, \mu(x, a), \eta(x, d))$, де X – множина осіб, яких обстежували; A – показники обстежень; d – результати діагностування. Функції $\mu(x, a)$, $\eta(x, d)$ використовують для обчислення значень атрибутів таблиці. Множина результатів обстежень за показниками A розбита на підмножини $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$, де A_1 – інформативні властивості (реєстраційні дані особи); A_2 – результати діагностування в ПМПК; A_3 – оцінки, отримані від батьків; A_4 – інформація від особи. Результати діагностування d формують множину атрибутів прийняття рішень $d = \{d_1, \dots, d_8\}$, де d_i – нозології, $i = \overline{1, 8}$. Тобто в ході формульовання опису предметної області створено таблицю прийняття рішень $T = (X, \{A_1, A_2, A_3, A_4\} \cup \{d_1, d_2, \dots, d_8\})$.

Модель підпроцесу попереднього опрацювання даних у разі застосування методів наближених множин (*rough set*) має вигляд $M_2 = (T, Discr(vik), EscC(a))$, де функція *Discr(vik)* виконує дискретизацію неперервних значень *vik* із використанням алгоритму булевого виведення

(Boolean reasoning), функція $EscC(a)$ усуває несуттєві атрибути шляхом побудови редуктів із використанням алгоритму Джонсона.

Модель *підпроцесу виявлення залежностей у даних* набуває вигляду: $M_3 = (T, S, Pat(x))$, де функція $Pat(x)$ буде класифікатор у формі множини класифікаційних правил.

Модель *підпроцесу оцінювання та інтерпретації* розглядаємо у вигляді: $M_4 = (T, Test(x), F(x), Evl(d))$, де функція $Test(x)$ створює тестову множину об'єктів X , на яких обчислено оцінки їх значень F . $Evl(d)$ – функція оцінювання якості класифікації.

Висновки. Формування сховища даних комплексної оцінки особи на основі внесених у базу даних результатів діагностування особи у ПМПК дає змогу накопичувати інформацію про динаміку психологічного та фізичного розвитку особи, яка має особливі потреби. Аналіз даних сховища комплексної оцінки особи уможливлює конструювання моделей научуваності, що є необхідним при розробленні сучасних систем самонавчання тощо, математичних моделей навчання і т. п.

Список літератури: 1. Shestakevych T. The use of Petri Nets for inclusive education IT-support / T. Shestakevych, V. Pasichnyk // Econtechmod, 2015. – Vol. 4. – № 2. – P. 33-38. 2. Race, Ethnicity, and Language Data: Standardization for Health Care Quality Improvement. Improving Data Collection across the Health Care System / Agency for Healthcare Research and Quality, Rockville, MD. 2014. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ahrq.gov/research/findings/final-reports/iomracerreport/index.html>. 3. Завалій Т.І. Методи та засоби структурування і зберігання даних в електронних медичних картках / Т.І. Завалій, Ю.В. Нікольський // Вісник. НУ "Львівська політехніка". – Львів, 2010. – № 689: Інформаційні системи та мережі. – С.158-168. 4. Литвин В.В. Аналіз даних та знань: навч. посібник / В.В. Литвин, В.В. Пасічник, Ю.В. Нікольський. – Львів: Магнолія-2006, 2015. – 276 с. 5. Khnaissar C. Data Warehouse Design Methods Review: Trends, Challenges and Future Directions for the Healthcare Domain // C. Khnaissar, L. Lavoie, H. Diab, J.-F. Ethier // Springer International Publishing Switzerland, 2015. – Т. 539. – P. 76-87. 6. Audigier V. A principal component method to impute missing values for mixed data / Advances in Data Analysis and Classification // V. Audigier, F. Husson, J. Josse. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 1-22. 7. Jemal D. What If Mixing Technologies for Big Data Mining and Queries Optimization / Lecture Notes in Computer Science // D. Jemal, R. Faiz. – Intern. Conf., ICCCI 2015, Madrid, Spain, September 21-23, 2015. – Part II. – V. 9330. – Springer, 2015.– С. 619-627. 8. Shen L. Research of Customer Classification Based on Rough Set Using Rosetta Software / L. Shen, S. Chen // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Intern. Conf. on Communication, Electronics and Automation Engineering. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – V. 181. – P. 837-843. 9. Choi G. Analysis of Medical Data Using the Big Data and R. Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing // G. Choi, K. Lee, D. Seo, S. Kim, D. Kim, Y. Lee. – Springer Science+Business Media Singapor, 2015. – V. 373. – P. 867-873. 10. Пасічник В.В. Сховища даних Навч. посібн. // В.В. Пасічник, Н.Б. Шаховська. – Магнолія-2006, 2008. – 496 с.

References:

1. Shestakevych, T. and Pasichnyk, V. (2015) "The use of Petri Nets for inclusive education IT-support", *Econtechmod*, No. 4 (2), pp. 33–38.
2. "Race, Ethnicity, and Language Data: Standardization for Health Care Quality Improvement. Improving Data Collection across the Health Care System" (2014), Available at: www.ahrq.gov/research/findings/final-reports/iomracerreport/index.html (Accessed: 10 February 2016).
3. Zavalij, T.I. and Nikolskij, J.V. (2010), "Methods and tools for structuring and storing data in electronic medical records", *Visnuk. NU LP Information systems and networks*, No. 689, pp. 158–168.
4. Lytvyn, V.V., Pasichnyk, V.V. and Nikolskij, J.V. (2015), *Data analysis and knowledge*. Magnolija-2006, Lviv, 276 p.
5. Khnaissner, C., Lavoie, L., Diab, H. and Ethier, J.. (2015) "Data Warehouse Design Methods Review: Trends, Challenges and Future Directions for the Healthcare Domain", *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 539, pp. 76-87.
6. Audigier, V., Husson, F. and Josse, J. (2013), "A principal component method to impute missing values for mixed data", *Advances in Data Analysis and Classification*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-22.
7. Jemal, D. and Faiz, R. (2015), "What If Mixing Technologies for Big Data Mining and Queries Optimization", *Computational Collective Intelligence, Intern. Conf., ICCCI 2015*, Madrid, Spain, pp. 619-627.
8. Shen, L. and Chen, S. (2013), "Research of Customer Classification Based on Rough Set Using Rosetta Software", *Advances in Intelligent Systems and Computing. – Intern. Conf. on Communication, Electronics and Automation Engineering*, Vol. 181, pp. 837-843.
9. Choi, G., Lee, K., Seo, D., Kim, D. and Lee, Y. (2015), "Analysis of Medical Data Using the Big Data and R", *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing*, Springer Science+Business Media Singapor, Vol. 373, pp. 867-873.
10. Pasichnyk, V. and Shakhovska, N. (2008), *Data Warehousing*. Magnolija-2006, Lviv, 496 p.

На дійшила (received) 13.04.2016

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

Volodymyr Pasichnyk, Dr. Sci. Tech., Professor
National University "Lviv Polytechnic"
Str. S. Bandera, 12, Lviv, Ukraine, 79013
e-mail: Volodymyr.V.Pasichnyk@lpnu.ua
ORCID ID 0000-0002-5231-6395

Tetiana Shestakevych, Assistant
National University "Lviv Polytechnic"
Str. S. Bandera, 12, Lviv, Ukraine, 79013
e-mail: Tetiana.V.Shestakevych@lpnu.ua
ORCID ID 0000-0002-4898-6927

УДК 004.942

Модель процесу аналізу даних психофізіологічного діагностування
/ Пасічник В.В., Шестакевич Т.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та
моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 86 – 91.

Інформаційно-технологічна підтримка первого етапу інклузивного навчання полягає у реалізації процесів накопичення результатів психофізіологічного діагностування особи, формуванні та аналізі комплексної оцінки особи. Формування моделі процесу аналізу накопичених результатів медичного та психологічного діагностування особи є етапом розроблення інформаційної технології підтримки процесу визначення психофізіологічних особливостей особи за допомогою інтелектуального та багатовимірного аналізу даних. Бібліогр.: 10.

Ключові слова: інклузивне навчання, психофізіологічне діагностування, комплексна оцінка, модель процесу аналізу даних, комплексна оцінка особи.

УДК 004.942

Модель процесса анализа данных психофизиологического диагностирования
/ Пасичник В.В., Шестакевич Т.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и
моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 86 – 91.

Информационно-технологическая поддержка первого этапа инклузивного обучения заключается в реализации процессов накопления результатов психофизиологического диагностирования, формировании и анализе комплексной оценки личности. Формирование модели процесса анализа накопленных результатов медицинского и психологического диагностирования личности является этапом разработки информационной технологии поддержки процесса определения психофизиологических особенностей личности с помощью интеллектуального и многомерного анализа данных. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: инклузивное обучение, психофизиологическое
диагностирование, модель процесса анализа данных, комплексная оценка личности.

UDK 004.942

The models of data analysis process of psychophysiological diagnostics
/ Pasichnyk V.V., Shestakevych T.V. // Herald of the National Technical University "KhPI".
Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21
(1193). – P. 86 – 91.

Information and technology support of the first phase of inclusive education process is an accumulation of results of psychophysiological diagnostics, as well as forming and analyzing comprehensive assessment of the person. Modeling the process of analysis of the accumulated medical and psychological diagnosis results is the stage of development of information technology support for the process of determining the physiological characteristics of individuals using intellectual and multivariate analysis. Refs.: 10 titles.

Keywords: inclusive education, psychophysiological diagnostics, comprehensive
assessment of the person, modeling the process of analysis.

H.B. ПРЕВИСОКОВА, канд. техн. наук, доц., Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ГАЛУА

Пропонується метод кодування інформації на основі ортогонального перетворення в системах функцій Галуа. Визначено ефективність кодування на основі перетворення Галуа та здійснено порівняльний аналіз з іншими методами кодування на основі перетворень та методом імпульсно-кодової модуляції в задачах зменшення надлишковості інформації. Іл.: 1. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: кодування на основі перетворення, ефективність кодування, функції Галуа, ортогональне перетворення, імпульсно-кодова модуляція.

Постановка проблеми. Швидкий розвиток комп'ютерних і телекомунікаційних систем призводить до виникнення необхідності постійного розвитку, вдосконалення та модифікації методів і алгоритмів зменшення надлишковості інформації [1, 2].

Особливість сучасних методів обробки інформаційних потоків полягає в пошуку і застосуванні найбільш ефективних перетворень, а також методів кодування інформації, і розглядати ці завдання необхідно комплексно.

Аналіз літератури. Відома група методів зменшення надлишковості інформації заснована на застосуванні до інформаційного потоку деякого ортогонального перетворення, а також подальшого квантування і кодування [1 – 3]. Ступінь зменшення надлишковості інформації та якість обробки залежать від обох цих етапів і від їх узгодженості з типом інформаційного потоку, який характеризується статистичними властивостями останнього.

Найпоширенішим методом кодування є імпульсно-кодова модуляція, яка використовується як основа для порівняння інших методів і схем [2 – 6].

Метод кодування інформації на основі перетворення суттєво відрізняється від імпульсно-кодової модуляції, яка застосовується безпосередньо до інформаційного потоку. Кодування на основі перетворення є непрямим методом, при якому до інформаційного потоку застосовується унітарне математичне перетворення, а отримані в результаті коефіцієнти перетворення квантуються і кодуються [1, 3], що дозволяє ефективно розв'язати задачі зменшення надлишковості при зберіганні та передаванні інфопотоків. Переваги методу кодування з

перетворенням над імпульсно-кодовою модуляцією залежно від властивостей заданого вхідного вектора досліджені в літературі [2 – 6].

Оптимальне для кодування інформаційних потоків перетворення Карунена-Лоєва [1 – 3] є єдиним унітарним перетворенням, в якому досягається повна декореляція коефіцієнтів, потребує знаходження власних значень та власних векторів для кожного вхідного інфопотоку, тому складно реалізується на практиці [1 – 3]. Це зумовлює необхідність пошуку, побудови та дослідження нових базисів, які дозволяють наблизити показники ефективності до оптимальних.

Ефективність застосування відомих у класі теоретико-числових ортогональних перетворень Уолша та Хаара досліджено в роботах [1, 3]. Водночас показано, що дані перетворення не забезпечують оптимального розв'язання задач обробки і залежать від особливостей та характеристик аналізованих інформаційних потоків. У роботі [7] розроблено одновимірне ортогональне перетворення на основі системи функцій Галуа [8], властивість рекурсивного формування яких дозволяє використовувати апарат циркулянтних перетворень і зменшити обчислювальну складність алгоритмів. Водночас дослідження методу кодування на основі даного перетворення не проводилось, що обмежує області ефективного застосування даного методу обробки інформації. Це зумовило необхідність вирішення задачі побудови ортогональних систем Галуа, виконання дискретних перетворень та кодування інформації на їх основі, а також визначення ефективності кодування з перетворенням порівняно з імпульсно-кодовою модуляцією.

Мета статті. Дослідження та аналіз методу кодування інформації на основі ортогонального перетворення Галуа, визначення його ефективності та порівняння з іншими методами кодування на основі перетворень та імпульсно-кодовою модуляцією в задачах зменшення надлишковості інформації для підвищення точності подання одновимірних інформаційних потоків.

Кодування на основі перетворення. Дискретне ортогональне перетворення виконується в системі N лінійно-незалежних (ортогональних) векторів $\{\varphi_k(j)\}$ на інтервалі $0 \leq j \leq N-1$, яка називається базисом перетворення [1 – 3] і задовільняє властивість

$$\sum_{j=0}^{N-1} \varphi_k(j) \varphi_l(j) = \begin{cases} 1, & k = l, \\ 0, & k \neq l, \end{cases}$$

де $j = 0, 1, \dots, N-1$ – змінна часу, $k = 0, 1, \dots, N-1$. Базисні вектори $\{\varphi_k(j)\}$ є рядками матриці перетворення $\Phi = [\varphi_k(j)]$ розміру $N \times N$.

У матричній формі дискретне перетворення вхідного вектора

відліків інформаційного потоку X розміру N у базисі, заданому матрицею Φ , подається згідно

$$Y = \Phi X, \quad (1)$$

де Y – вектор коефіцієнтів перетворення.

Під кодуванням на основі перетворення розуміють квантування коефіцієнтів перетворення із наступним кодуванням, визначене у [2, 3]

$$\tilde{Y} = Q\{X\}.$$

Відновлення сигналу за квантованими коефіцієнтами вектора \tilde{Y} визначається як

$$\tilde{X} = \Phi^{-1}\tilde{Y}.$$

Квантування і кодування коефіцієнтів перетворення інформаційного потоку використовується для зменшення надлишковості з втратами.

Для оцінювання ефективності кодування на основі перетворення в заданому базисі використовується статистична модель вхідного сигналу [2, 3, 5, 6]. У даній моделі вхідний N -координатний вектор X розглядається як вибірка випадкового процесу. Елементи вектора X є реалізацією одновимірного марківського процесу першого порядку з нульовим математичним сподіванням, одиничною дисперсією, заданого коваріаційною матрицею C_X , (i, j) -й елемент якої дорівнює $\rho^{|i-j|}$, $0 \leq \rho \leq 1$ – коефіцієнт кореляції між сусідніми елементами.

Для ортогонального перетворення (1) коваріаційна матриця C_Y вектора коефіцієнтів перетворення визначається як математичне сподівання $C_Y = E[YY^T] = \Phi C_X \Phi^T = \{c_Y(i, j)\}$ [2, 3, 5, 6]. Елементи головної діагоналі матриці C_Y є дисперсіями спектральних компонент $\sigma^2(i) = c_Y(i, i)$.

Ефективність кодування інформаційного потоку X визначається квантуванням, характеристики якого залежать від функції щільності імовірності.

Одним із відомих методів оптимального квантування коефіцієнтів перетворення є процедура Ллойда-Макса [2, 5], що забезпечує мінімальне спотворення елементів вектора перетворення.

Показником ефективності кодування на основі перетворення (англ. transform coding) порівняно з імпульсно-кодовою модуляцією є відношення середнього арифметичного дисперсій коефіцієнтів перетворення до їх середнього геометричного, яке відображає у скільки

разів менша похибка відновлення при кодуванні на основі перетворення порівняно з безпосередньою імпульсно-кодовою модуляцією [4, 6]

$$GTC = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N \sigma^2(i)}{\left(\prod_{i=1}^N \sigma^2(i)\right)^{1/N}}. \quad (2)$$

Побудова базисів ортогональних перетворень Галуа. Серед основних теоретико-числових базисів [8] дискретних ортогональних перетворень ортонормованими та повними є системи функцій Уолша та Хаара [1, 3].

Система функцій Уолша [3] визначається як добуток функцій Радемахера $Rad(n, \theta) = sign(\sin(2^n \pi \theta))$ на інтервалі $0 \leq \theta < 1$

$$Wal(i, \theta) = Rad(1, \theta)^{b_0} Rad(2, \theta)^{b_1} \dots Rad(n, \theta)^{b_{n-1}} = \prod_{k=0}^{n-1} (Rad(k+1, \theta))^{b_k},$$

де $i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ – порядковий номер функції; $i = b_{n-1}b_{n-2} \dots b_1b_0$ – подання в коді Грэя.

Система функцій Хаара $Har(n, \theta, j)$ означається [3]

$$Har(n, \theta, l) = \begin{cases} 2^{\frac{n-1}{2}} sign(\sin 2^n \pi \theta), & l/2^{n-1} \leq \theta < (l+1)/2^{n-1}, \\ 0 & \text{при інших } \theta \in [0, 1], \end{cases}$$

де $n = 0, 1, \dots, \log_2 N$; $l = 0, 1, \dots, 2^{n-1} - 1$, ($l = 0$ при $n = 0$).

Базисами дискретного ортогонального перетворення в системах функцій Галуа є повні ортогональні системи $\{G(n, \theta, i)\}$ [7] різних порядків n , одержані із рекурсивних систем функцій Галуа [8].

Рекурсивні системи функцій Галуа $\{Gal(n, \theta, i)\}$ [8] утворюються відповідно до породжуючого вектора поля Галуа $GF(2^n)$, елементами якого є коефіцієнти незвідного полінома $p(x)$ характеристики 2 з коефіцієнтами із поля $GF(2)$ (табл.1).

Наприклад, у полі $GF(2^3)$ із початкових векторів $(g_0, g_1, g_2) = (1, 1, 1)$ і $(g_0, g_1, g_2) = (0, 0, 0)$ формуються чотири рекурсивні послідовності $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{2^n - 2}$ за правилами, які відповідають

породжуючим векторам: $(1, 0, 1, 1) \rightarrow g_{j+3} = g_j \oplus g_{j+2};$ $(1, 1, 0, 1) \rightarrow$
 $\rightarrow g_{j+3} = g_j \oplus g_{j+1};$ $(1, 0, 1, \bar{1}) \rightarrow g_{j+3} = \overline{g_j \oplus g_{j+2}};$ $(1, 1, 0, \bar{1}) \rightarrow$
 $\rightarrow g_{j+3} = \overline{g_j \oplus g_{j+1}}.$

Таблиця 1
Приклади поліномів $p(x)$ характеристики 2 з коефіцієнтами із поля $GF(2)$ та відповідні їм породжуючі вектори

n	Породжуючий поліном $p(x)$	Породжуючі вектори
3	$x^3 + x + 1$	$(1, 0, 1, 1), (1, 0, 1, \bar{1})$
3	$x^3 + x^2 + 1$	$(1, 1, 0, 1), (1, 1, 0, \bar{1})$
4	$x^4 + x + 1$	$(1, 0, 0, 1, 1), (1, 0, 0, 1, \bar{1})$
4	$x^4 + x^3 + 1$	$(1, 1, 0, 0, 1), (1, 1, 0, 0, \bar{1})$
4	$x^4 + x^2 + 1$	$(1, 0, 1, 0, 1), (1, 0, 1, 0, \bar{1})$
5	$x^5 + x^2 + 1$	$(1, 0, 0, 1, 0, 1), (1, 0, 0, 1, 0, \bar{1})$
5	$x^5 + x^3 + 1$	$(1, 0, 1, 0, 0, 1), (1, 0, 1, 0, 0, \bar{1})$
6	$x^6 + x + 1$	$(1, 0, 0, 0, 0, 1, 1), (1, 0, 0, 0, 0, 1, \bar{1})$
6	$x^6 + x^5 + 1$	$(1, 1, 0, 0, 0, 0, 1), (1, 1, 0, 0, 0, 0, \bar{1})$

Кожна одержана послідовність містить підпослідовність із $n-1$ елементів, які дорівнюють нулю $(g_j, g_{j+1}, \dots, g_{j+n-2}) = (0, 0, \dots, 0)$. Даної підпослідовність доповнюється ще одним нульовим елементом $(g_j, g_{j+1}, \dots, g_{j+n-2}, 0)$ так, щоб довжина всієї утвореної послідовності, яка позначається $\{v_j\}$, становила $N = 2^n$, $j = 0, 1, \dots, N-1$.

Функції рекурсивної системи $\{Gal(n, \theta, i)\}$ в точках $\theta = j/N$ інтервалу $\theta \in [0; 1]$ визначаються із послідовності $\{v_j\}$ та доозначаються до неперервних на інтервалах $\theta \in [j/N; (j+1)/N]$:

$$Gal(n, \theta, 0) = Gal(n, j/N, 0) = 1 - 2v_j,$$

$$Gal(n, \theta, i+1) = Gal(n, \theta + 1/N, i),$$

де $n = 1, 2, \dots$ – порядок функцій; $N = 2^n$ – кількість функцій у системі.

Оскільки $v_j = 1$ або $v_j = 0$, то функції $Gal(n, \theta, i) = \pm 1$.

Ортогональні функції $\{G(n, \theta, i)\}$ [7] одержують застосуванням процедури ортогоналізації Грама-Шмідта [9] до функцій системи $\{Gal(n, \theta, i)\}$:

$$G(n, \theta, 0) = 1, \quad (3)$$

$$G(n, \theta, k+1) = Gal(n, \theta, k) - \sum_{i=0}^k \frac{\langle Gal(n, \theta, k), G(n, \theta, i) \rangle}{\|G(n, \theta, i)\|_{L_2}^2} G(n, \theta, i), \quad (4)$$

де $k = 0, 1, \dots, N-1$ – порядковий номер функції; $\|G(n, \theta, i)\|_{L_2}^2$ – норма в просторі інтегровних з квадратом функцій $L_2[0,1]$; $\langle Gal_m(n, \theta, k+1), G(n, \theta, i) \rangle$ – скалярний добуток.

Таким чином, на основі породжуючих векторів полів $GF(2^n)$ порядків $n \geq 2$, основна частина яких наведена у табл. 1, за формулами (3), (4) побудовано сімейство систем ортогональних функцій Галуа $\{G(n, \theta, i)\}$ із $N = 2^n$ функцій, які характеризуються порядком n .

Ефективність кодування на основі перетворення Галуа. Дискретне матричне ортогональне перетворення Галуа [7] одновимірного інформаційного потоку $\{X(0), X(1), \dots, X(N-1)\}$ визначається як добуток

$$Y = GX, \quad (5)$$

де $Y = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T$ – транспонований вектор спектральних коефіцієнтів перетворення Галуа; $X = [X(0), X(1), \dots, X(N-1)]^T$ – траспонований вхідний вектор; G – матриця розміру $N \times N$ значень ортогональних функцій Галуа в точках $\theta = j/N$.

У побудованих ортогональних базисах Галуа (3), (4) виконано перетворення (5), досліджено ефективність кодування на основі даного перетворення та здійснено порівняльний аналіз з кодуванням на основі перетворень Уолша і Хаара у задачах зменшення надлишковості інформаційних потоків. Дослідження перетворення здійснено на моделі вхідного одновимірного інформаційного потоку, яка застосовується для визначення ефективності перетворень і подана в першій частині статті.

З метою визначення ефективності кодування на основі розробленого перетворення обчислено коефіцієнт GTC згідно (2), який відображає в скільки разів менша середньоквадратична похибка відновлення інформаційного потоку при кодуванні на основі перетворення порівняно з використанням імпульсно-кодової модуляції. Обчислені для перетворень Уолша (GTC_{wal}), Хаара (GTC_{har}) та Галуа з

породжуючими векторами $(1, 0, 1, 1)$ та $(1, 1, 0, 1)$ ($GTC_{gal(1,0,1,1)}$ та $GTC_{gal(1,1,0,1)}$) значення показника GTC в залежності від коефіцієнта кореляції ρ між сусідніми елементами вибірки розміру $N = 8$ та розміру $N = 64$ наведено на рис.

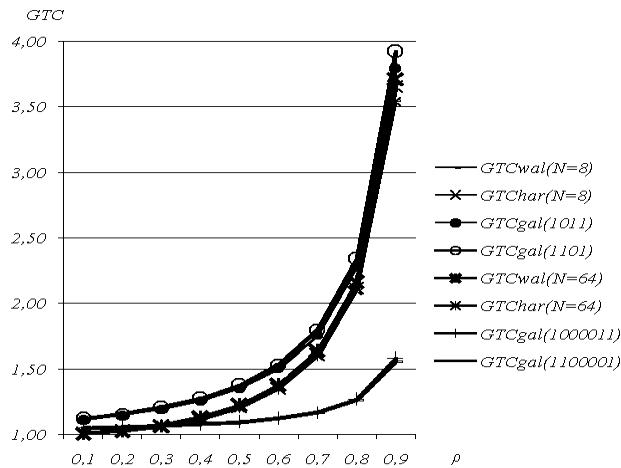


Рис. Відношення похибок відновлення при кодуванні на основі перетворення розмірів $N = 8$ та $N = 64$ та імпульсно-кодовій модуляції

На основі виконаних обчислень показника GTC та аналізу рис. можна зробити висновки, що для всіх досліджених довжин перетворень $GTC_{gal} > 1$, що визначає більшу ефективність кодування на основі перетворення Галуа порівняно з імпульсно-кодовою модуляцією. Використання ортогонального перетворення Галуа розміру $N = 8$ для всіх досліджених значень ρ і для векторів розмірів від $N = 16$ до $N = 256$ із коефіцієнтом $0,1 \leq \rho \leq 0,3$ забезпечує вищий показник GTC . З обчислених відношень $k_{GTCGW} = GTC_{gal} / GTC_{wal}$, $k_{GTCGH} = GTC_{gal} / GTC_{har}$ та одержаних оцінок $1,1 < k_{GTCGW} < 1,14$, $1,1 < k_{GTCGH} \leq 1,14$ слідує, що застосування методу кодування на основі ортогонального перетворення Галуа порівняно з перетвореннями Уолша та Хаара дозволяє зменшити середньоквадратичну похибку відновлення інформаційних потоків у 1,1 – 1,14 разів.

Висновки. Запропоновано і здійснено дослідження ефективності методу кодування одновимірних інформаційних потоків на основі перетворення в ортогональних системах Галуа, породжених різними

векторами полів $GF(2^n)$. Пропонований метод полягає в квантуванні і кодуванні коефіцієнтів ортогонального перетворення Галуа.

Результати проведених досліджень дають можливість зробити висновок, що запропонований метод кодування інформації на основі ортогонального перетворення Галуа порівняно із відомими перетвореннями та методом імпульсно-кодової модуляції дозволяє збільшити точність відновлення даних і може використовуватись для кодування та зменшення надлишковості інформаційних потоків.

Список літератури: 1. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с. 2. Akansu N. Multiresolution Signal Decomposition: Transforms, Subbands, and Wavelets (Second Edition) / N. Akansu, R.A. Haddad. – San Diego, USA: Academic Press, 2001. – 499 р. 3. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К.Р. Рао. – М.: Связь, 1980. – 248 с. 4. O. Yilmaz. Quantization of Eigen Subspace for Sparse Representation / O. Yilmaz, A.N. Akansu // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2015. – Vol. 63. – №. 14. – P. 3616-3625. 5. Torun M.U. An Efficient Method to Derive Explicit KLT Kernel for First-Order Autoregressive Discrete Process / M.U. Torun, A.N. Akansu // IEEE Trans. on Signal Processing. – Aug. 2013. – Vol. 61. – №. 15. – P. 3944–3953. 6. Гнатів Л.А. Методы синтеза эффективных ортогональных преобразований высокой и низкой корреляции и их быстрых алгоритмов для кодирования и сжатия цифровых изображений / Л.А. Гнатів, Е.С. Шевчук // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 6. – С. 104–117. 7. Превисокова Н.В. Метод обробки інформації на основі дискретного ортогонального перетворення Галуа / Н.В. Превисокова // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. Технічні науки. – 2010. – № 2 (146). – С. 149–156. 8. Петришин Л.Б. Теоретичні основи перетворення форми та цифрової обробки інформації в базисі Галуа: Навчальний посібник / Петришин Л.Б. – К.: ІзіМН МОУ, 1997. – 237 с. 9. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 272 с.

References:

1. Salomon, D. (2004), "A Guide to Data Compression", Tehnosfera, Moscow, 368 p.
2. Akansu, N. Haddad, R.A. (2001), *Multiresolution Signal Decomposition: Transforms, Subbands, and Wavelets*. 2nd ed., Academic Press, San Diego, 499 p.
3. Ahmed, N. and Rao, K. (1980), *Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing*, Svjaz, Moscow, 248 p.
4. Yilma, O. and Akansu, A.N. (2015), "Quantization of Eigen Subspace for Sparse Representation", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 63, No. 14, pp. 3616-3625.
5. Torun, M.U. and Akansu, A.N. (2013), "An Efficient Method to Derive Explicit KLT Kernel for First-Order Autoregressive Discrete Process", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 61, No. 15, pp. 3944-3953.
6. Gnativ, L.A. and Shevchuk, E.S. (2002), "Methods used for synthesis of efficient orthogonal transforms of high and low correlation and their fast algorithms for digital image coding and compression", *Cybernetics and Systems Analysis*, No. 6, pp. 104–117.
7. Prevyssokova, N.V., (2010), "The method of information processing based on discrete orthogonal transformation Galois", *Herald of Khmelnytskyi national university*, No. 2 (146), pp.149–156.
8. Petryshyn, L.B. (1997), *Theoretical Foundations conversion and digital forms of information processing in the base of Galois*, IziMN MOU, Kiev, 237 p.

9. Solodovnikov, A.I. and Spivakovski, A.M. (1986), *Fundamentals of the theory and methods of information spektralnoy obrabotku*, Leningrad University Publishing, Leningrad, 272 p.

Надійшла (received) 30.03.2016

Статью представил д.т.н., проф. завідувач кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки ДВНЗ "Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника" Когут І.Т.

Prevysokova Natalija, Cand. Tech. Sci., Docent
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Str. Shevchenko, 57, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76000
Tel.: (034) 259-60-86, e-mail: nataliia.prevysokova@pu.if.ua

УДК 621.391, 519.651

Аналіз ефективності методу кодування інформації на основі ортогонального перетворення Галуа / Н.В. Превисокова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 92 – 101.

Пропонується метод кодування інформації на основі ортогонального перетворення в системах функцій Галуа. Визначено ефективність кодування на основі перетворення Галуа та здійснено порівняльний аналіз з іншими методами кодування на основі перетворень та методом імпульсно-кодової модуляції в задачах зменшення надлишковості інформації. Іл.: 1. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: кодування на основі перетворення, ефективність кодування, функції Галуа, ортогональне перетворення, імпульсно-кодова модуляція.

УДК 621.391, 519.651

Анализ эффективности метода кодирования информации на основе ортогонального преобразования Галуа / Н.В. Превисокова // Весник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 92 – 101.

Предлагается метод кодирования информации на основе ортогонального преобразования в системах функций Галуа. Определена эффективность кодирования на основе преобразования Галуа и осуществлен сравнительный анализ с другими методами кодирования на основе преобразований и методом импульсно-кодовой модуляции в задачах уменьшения избыточности информации. Ил.: 1. Табл.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: кодирование на основе преобразования, эффективность кодирования, функции Галуа, ортогональное преобразование, импульсно-кодовая модуляция.

UDC 621.391, 519.651

Efficiency analysis of the method transform coding information on the Galois functions base / N.V. Preysokova // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 92 – 101.

There have proposed method transform coding information on the Galois orthogonal functions base. A family of Galois orthogonal functions is formed and it is calculated orthogonal transform on this family base. The efficiency of Galois transform coding is calculated and comparative analysis with other transform coding methods and pulse code modulation is performed to solve the data compression problems. Figs.: 1. Tabl.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: transform coding, efficiency of Galois transform, Galois functions, orthogonal transform, pulse code modulation.

Г.А. САМИГУЛИНА, д-р техн. наук, зав. лаб. "Интеллектуальные системы управления и прогнозирования", Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан,

З.И. САМИГУЛИНА, вед. научн. сотр., Ph.D, лаб. "Интеллектуальные системы управления и прогнозирования", Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ИММУННОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ДИЗАЙНА СУЛЬФАНИЛАМИДОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА RANDOM FOREST

Статья посвящена исследованиям в области компьютерного молекулярного дизайна новых лекарственных препаратов сульфаниламидов на основе технологии иммунносетевого моделирования. В качестве метода предварительной обработки данных для выделения информативных дескрипторов и построения оптимальной иммунносетевой модели представлен алгоритм Random Forest, который позволяет ранжировать переменные по степени значимости. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: компьютерный молекулярный дизайн, технология иммунносетевого моделирования, сульфаниламиды, алгоритм Random Forest.

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время актуальна разработка и применение новых интеллектуальных технологий для QSAR (прогнозирование зависимости "структура – активность") при целенаправленном синтезе лекарственных соединений, обладающих необходимым комплексом фармакологических свойств. Применение компьютерного молекулярного дизайна на основе интеллектуальных подходов значительно сокращает временные, вычислительные и финансовые ресурсы при создании новых лекарственных соединений.

Современные методы QSAR широко применяют интеллектуальные алгоритмы для синтеза новых лекарственных препаратов. К методам искусственного интеллекта, используемым для прогнозирования зависимости "структура – активность", относятся: искусственные нейронные сети [1], генетические алгоритмы [2], искусственные иммунные системы [3], роевой интеллект [4 – 5] (алгоритм муравьиных колоний, пчелиный алгоритм) и т.д.

В связи с экспоненциальным ростом потребности в новых соединениях в фармацевтической промышленности требуется разработка нетрадиционных методов для обработки многомерной структурной информации. По сведениям одного из главных поставщиков химической

© Г.А. Самигулина, З.И. Самигулина, 2016

информации CAS число структур химических соединений составляет около 60 млн. [6]. Самый крупный поставщик образцов химических соединений ChemNavigator предлагает около 59,9 млн. уникальных веществ [7]. Число виртуальных молекул (содержащих до 13 атомов) сгенерированных компьютером за последнее время составляет почти миллиард. В связи с этим при компьютерном молекулярном дизайне актуально применение различных интеллектуальных и статистических подходов для решения проблемы выделения информативных дескрипторов, характеризующих химическое вещество. Широкое применение нашли такие статистические подходы как: факторный анализ (Factor Analysis, FA) [8], метод-опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) [9], случайный лес (Random Forest, RF) [10] и др.

Алгоритм Random Forest представляет особый интерес в качестве метода обработки химической структурной информации. Например, в работе [11] авторами представлен подход для прогнозирования активности 1-, 3-, 5-триазинов, как каннабиноидных рецепторов (CB2) с использованием RF метода. Вычисляется двадцать молекулярных дескрипторов для набора данных из 58 аналогов. В зависимости от значений дескрипторов осуществляется обучение случайного леса для поиска связи между биологической активностью и молекулярной структурой аналогов. Результаты, полученные с помощью случайного леса сравнивались с методом опорных векторов и деревьями решений (Decision Trees, DT). Наилучший результат (100%) показал метод RF относительно метода SVM (93%) и DT (67%) соответственно. Работа [12] посвящена исследованиям рецептора эпидермального фактора роста (EGFR) при лечении раковых болезней. Ранее был разработан ряд моделей QSAR, посвященный прогнозированию ингибитирующей активности молекул против EGFR. Авторами [12] сделана попытка разработки моделей прогнозирования на большом множестве молекул (~ 3500 молекул), которые включают в себя различные каркасы, такие как хиназолин, пиридин, хинолин и индол. В работе использовалась база данных PubChem, при этом применение алгоритма Random Forest дало максимальный результат с точностью 83,7%. В исследовании [13] представлено применение алгоритма Random Forest при разработке моделей QSAR предсказания токсичности водной среды химических соединений. Работа [14] посвящена разработка нового алгоритма интерпритации моделей случайного леса. Алгоритм позволяет вычислить вклад каждого дескриптора. Предлагаемая мера информативности дескрипторов не является альтернативой важности переменной Бреймана, но она характеризует вклад конкретной переменной к расчетному значению отклика при исследовании зависимости "структурно-активность" химических соединений. Таким образом,

исследования в области применения современных методов искусственного интеллекта и статистических подходов при построении QSAR моделей являются актуальной задачей.

Цель статьи – построение оптимальной иммунносетевой модели при прогнозировании зависимости "структура – активность" лекарственных соединений сульфаниламидов на основе выделения информативных дескрипторов с использованием алгоритма Random Forest. Критерием оптимальности является максимальное сохранение информации о химическом соединении при минимальном количестве дескрипторов.

Реализация алгоритма Random Forest для построения оптимальной иммунносетевой модели. Рассмотрим иммунносетевую технологию прогнозирования зависимости "структура – активность" лекарственных соединений (сульфаниламидов) на основе искусственных иммунных систем [15]. На первом шаге осуществляется выбор химических соединений для исследования, затем описание структуры соединений на основе дескрипторов и их классификация по прогностическим группам. Далее осуществляется построение оптимальной математической модели (временных рядов – эталонов, состоящих из дескрипторов, описывающих структуру выбранных химических веществ с известными свойствами). На следующем шаге осуществляется обучение искусственной иммунной системы по эталонам. Затем реализуется алгоритм распознавания образов на основе сингулярного разложения матриц для определения класса, к которому принадлежат рассматриваемые образы. Оценка энергетических погрешностей по гомологам позволяет определить эффективность распознавания образов. После этого производится отбор кандидатов лекарственных соединений с заданными свойствами для дальнейших исследований.

При построении оптимальной иммунносетевой модели применяется мультиалгоритмический подход, который заключается в следующем [16]. На этапе предварительной обработки исходного набора дескрипторов сульфаниламидов выбираются несколько интеллектуальных или статистических алгоритмов [17], которые обрабатывают исходный набор дескрипторов. Далее осуществляется выбор наилучшего из них, то есть выбирается алгоритм с наименьшей ошибкой обобщения.

В качестве одного из алгоритмов, используемых в мультиалгоритмическом подходе, выбран Random Forest. Метод основан на построении ансамбля деревьев решений.

Рассмотрим следующие понятия [18 – 19]: $T_i(x)$, $i = \overline{1, B}$ – это ансамбль деревьев решений, где x – вектор дескрипторов размерности N ; B – количество деревьев в ансамбле; $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ – обучающая выборка данных, где y_j , $j = \overline{1, n}$ – класс.

Далее из исходной выборки данных выбирается n случайных объектов с повторениями (bootstrap sample), принимающих значение D_i . Затем строится дерево решений для D_i (полное построение без отсечения ветвей) с повтором алгоритма B раз. Мера информативности дескрипторов, основанная на алгоритме Random Forest находится по следующему алгоритму.

Алгоритм.

1. Пусть x_i – некоторый дескриптор. Необходимо построить случайный лес и получить оценку вероятности ошибочной классификации E_i методом Out-Of-Bag, предложенным Брейманом [19] на основе наблюдений, не входящих в bootstrap выборки. Данные выборки называются выборками Out-Of-Bag.

2. В выборках Out-Of-Bag осуществить случайную перестановку значений дескриптора x_i для каждого дерева из построенного случайного леса.

3. По модифицированным Out-Of-Bag определяется оценка вероятности ошибочной классификации \hat{E}_i .

4. Определение информативности дескриптора x_i реализуется как значение разницы: $I(x_i) = \max(0, \hat{E}_i - E_i)$.

В качестве достоинств данного метода можно представить: высокое качество получаемых моделей; эффективная обработка данных с большим числом дескрипторов и классов; возможность распараллеливания алгоритмов для работы с большими данными; деревья решений являются удобной моделью для представления знаний в экспертных системах; нечувствительны к масштабированию; обучающая выборка может содержать признаки измеренные как в числовой, так и в номинальной шкале; наличие методов оценивания информативности отдельных дескрипторов за счет внутренней оценки Out-Of-Bag и т.д.

В качестве недостатков можно выделить: для некоторого типа задач (с наличием сильной зашумленности) возможно переобучение алгоритма; модели занимают много памяти для хранения данных.

Выводы. В настоящее время не существует универсальных методов для оценки меры информативности дескрипторов в исходной выборке данных, а поскольку при решении задач синтеза новых лекарственных

препаратов используется огромное количество структур химической информации, применение мультиалгоритмического подхода является удобным с точки зрения подбора наилучшего алгоритма для построения оптимальной иммунносетевой модели.

Алгоритм Random Forest с его достоинствами и малым количеством недостатков успешно применяется в качестве инструмента для оценки степени важности дескрипторов сульфаниламидов при построении оптимальной иммунносетевой модели для компьютерного молекулярного дизайна лекарственных препаратов на основе искусственных иммунных систем.

Исследования проводятся по гранту №ГР 0115PK00549 МОН РК по теме: Компьютерный молекулярный дизайн лекарственных препаратов на основе иммунносетевого моделирования (2015-2017 гг.).

References:

1. Montañez-Godínez, N., Martínez-Olguín, A.C., Deeb, O., Garduño-Juárez, R. and Ramírez-Galicia, G. (2015), "QSAR/QSPR as an Application of Artificial Neural Networks", *Journal Artificial Neural Networks*, Vol. 1260, pp. 319-333.
2. Nekoei, M., Mohammadhosseini, M. and Pourbasheer, E. (2015) "QSAR study of VEGFR-2 inhibitors by using genetic algorithm-multiple linear regressions (GA-MLR) and genetic algorithm-support vector machine (GA-SVM): a comparative approach", *Journal of Medicinal Chemistry Research*, Vol. 24, No. 7, pp. 3037-3046.
3. Ivancic, O. (2009), "Drug Design with Artificial Neural Networks", *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pp. 2139-2159.
4. Khajeh, A. Modarress, H. and Zeinoddini-Meymand, H. (2013), "Modified particle swarm optimization method for variable selection in QSAR/QSPR studies", *Journal of Structural Chemistry*, Vol. 24, No. 5, pp. 1401-1409.
5. Goodarzi, M., Freitas, M.P. and Jensen, R. (2009), "Ant colony optimization as a feature selection method in the QSAR modeling of anti-HIV-1 activities of 3-(3,5-dimethylbenzyl) uracil derivatives using MLR, PLS and SVM regressions", *Journal of Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 98, No. 2., pp. 123-129.
6. Blum, L. and Reymond, J. (2009), "970 million drug like small molecules for virtual screening in the chemical universe database GDB -13", *Journal of American Chemical Society*, Vol. 131 (25), pp. 8732-8733.
7. Nonell-Canals, A. and Mestres, J. (2011), "In silico target profiling of one billion molecules", *Molecular Informatics*, Vol. 30 (5), pp. 405-409.
8. Shahlaie, M., Fassihi, A., Pourhossein, A., Arkan, E. (2013), "Statistically validated QSAR study of some antagonists of the human CCR5 receptor using least square support vector machine based on the genetic algorithm and factor analysis", *Journal of Medicinal Chemistry Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 1399-1414.
9. Zhou, X.B., Han, W.J., Chen, J. and Lu, X.Q. (2011), "QSAR study on the interactions between antibiotic compounds and DNA by a hybrid genetic-based support vector machine", *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, Vol. 142, No. 9, pp. 949-959.
10. Sprague, B., Shi, Q., Kim, M.T., Zhang, L., Sedykh, S., Ichishi, E., Tokuda, H., Lee, K. and Zhu, H. (2014), "Design, synthesis and experimental validation of novel potential chemopreventive agents using random forest and support vector machine binary classifiers", *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, Vol. 28, No. 6, pp 631-646.

-
11. Abu El-Atta, A. and Hassanien, A.E. (2014), "Predicting Biological Activity of 2,4,6-trisubstituted 1,3,5-triazines Using Random Forest", *Advances in Intelligent Systems and Computing, Proceedings of the Fifth International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications IBICA 2014*, Vol. 303, pp. 101-110.
 12. Singh, H., Singh S., Singla, D., Agarwal, S.M. and Raghava, G.P. (2015), "QSAR based model for discriminating EGFR inhibitors and non-inhibitors using Random forest", *Biology Direct*, Vol. 10, No. 10, pp. 1-10.
 13. Polishchuk, P.G., Muratov, E.N., Artymenko, A.G., Kolumbin, O.G., Muratov, N.N. and Kuz'min, V.E. (2009), "Application of Random Forest Approach to QSAR Prediction of Aquatic Toxicity", *American Chemical Society*, Vol. 49, No. 11, pp. 2481-2488.
 14. Kuz'min, V.E., Polishchuk, P.G., Artymenko, A.G. and Andronati, S.A. "Interpritation of QSAR Models Based on Random Forest Methods", *Molecular Informatics*, Vol. 30, No. 6-7, pp. 593-603.
 15. Samigulina, G.A. and Samigulina, Z.I. (2015), "Computational molecular design of sulfonamides based on immune network modeling", *Twelve International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO)*, pp. 1-5.
 16. Samigulina, G.A., Samigulina, Z.I., Wuizik, W. and Krak, Yu. (2015), "Prediction of "structure – property" Dependence of New Organic Compounds on the basis of Artificial Immune Systems", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 47, No. 4, pp. 28-35.
 17. Samigulina, G.A. Building immunnosetevoy optimal model to predict the unknown properties of medicinal compounds based approach multialgoritmicheskogo (2013), *Informatics Problems*, Novosibirsk, No. 2, pp. 21-29.
 18. Breiman, L. (2001), "Random forests", *Machine Learning*, Vol 45, No. 1, pp. 5-32.
 19. Breiman, L. Cutler, A. (2005), *Random forests*, Berkley, 56 p.

Поступила (received) 6.05.2016

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

Samigulina Galina, Dr. Sci. Tech.
Institute of Information and Computing Technologies
Str. Pushkeen, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010
Tel:+7(777)244-43-67, e-mail: galinasamigulina@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-1798-9161

Samigulina Zarina, Cand. Sci. Tech.
Institute of Information and Computing Technologies
Str. Pushkeen, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010
Tel:+7(702)218-97-73, e-mail: zarinasamigulina@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5862-6415

УДК 004.89:004.4

Побудова оптимальної іммунносетевої моделі для комп'ютерного молекулярного дизайну сульфаниламідів на основі алгоритму Random Forest / Самігуліна Г.А., Самігуліна З.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 102 – 108.

Стаття присвячена дослідженням в області комп'ютерного молекулярного дизайну нових лікарських препаратів сульфаниламідів на основі технології іммунносетевого моделювання. Як метод попередньої обробки даних для виділення інформативних дескрипторів і побудови оптимальної іммунносетевої моделі представлений алгоритм Random Forest, який дозволяє ранжувати змінні за ступенем значущості. Бібліогр.: 19 назв.

Ключові слова: комп'ютерний молекулярний дизайн, технологія іммунносетевого моделювання, сульфаниламіди, алгоритм Random Forest.

УДК 004.89:004.4

Построение оптимальной иммунносетевой модели для компьютерного молекулярного дизайна сульфаниламидов на основе алгоритма Random Forest / Самигулина Г.А., Самигулина О.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 102 – 108.

Статья посвящена исследованиям в области компьютерного молекулярного дизайна новых лекарственных препаратов сульфаниламидов на основе технологии иммунносетевого моделирования. В качестве метода предварительной обработки данных для выделения информативных дескрипторов и построения оптимальной иммунносетевой модели представлен алгоритм Random Forest, который позволяет ранжировать переменные по степени значимости. Библтогр.: 19 назв.

Ключевые слова: компьютерный молекулярный дизайн, технология иммунносетевого моделирования, сульфаниламиды, алгоритм Random Forest.

UDC 004.89:004.4

Building of the immune network optimal model for computer molecular design sulfonamides based on random forest algorithm /Samigulina G.A., Samigulina Z.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 102 – 108.

The article is devoted to research in the field of the computer molecular design of the new drugs sulfonamides on the basis of immune network technology. As a method of the data pre-processing to extraction of the informative descriptors and building of the optimal immune network model presented the Random Forest algorithm, which allows to rank variables in the order of importance. Refs.: 19 titles.

Keywords: computer molecular design, immune network technology, sulfonamides, algorithm Random Forest.

M.B. СЕМАНЬКІВ, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", Івано-Франківськ

ОЦІНКА СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ВИПАДКОВИХ ЧИСЕЛ

Подано результати дослідження статистичних характеристик послідовностей псевдовипадкових чисел, що утворені методом Галуа на основі циклічних зсувів, за допомогою пакету статистичних тестів Diehard. Відзначено ефективність використання даного типу генератора в складі аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: псевдовипадкові числа, оцінка статистичних характеристик систем випадкових чисел, пакет статистичних тестів Diehard.

Постановка проблеми. В прикладних задачах випадкові числа знаходять досить широке застосування, зокрема, в області математичної статистики, чисельних методів оптимізації, імітаційному моделювання, комп’ютерного програмування, прийняття рішень і т.і. У різних предметних областях перед генераторами випадкових чисел стоять різні вимоги. Так, в деяких завданнях моделювання важливо, щоб послідовності випадкових чисел задовільняли рівень складності реалізації, в інших завданнях – тести на відсутність авто- та взаємної кореляції, або тести на рівномірність. Для вирішення різних завдань слід застосовувати різні генератори випадкових чисел, які для даної групи завдань є найбільш оптимальним вибором при дотриманні першочергових вимог. На сьогодні виникає питання дослідження та порівняння різних генераторів випадкових чисел з єдиних позицій. Виходом з цього положення є використання деякого стандартного набору статистичних тестів, які об’єднані єдиною методикою обчислення необхідних показників ефективності генераторів випадкових чисел і прийняття рішення про випадковість сформованих послідовностей.

Аналіз літератури. В [1, 2] подано аналіз принципів побудови і властивості генераторів псевдовипадкових чисел та описано методи оцінки якості генераторів. В [3] розкритий спосіб побудови генератора Галуа на основі циклічних зсувів. В [4 – 6] подано результати дослідження статистичних характеристик вказаного вище генератора. Способи використання тестів Diehard і рекомендації щодо інтерпретації отриманих результатів висвітлено в [7, 8]. Програмний продукт розміщений за адресою [9].

Проведений аналіз існуючих методів генерування випадкових чисел, складності їх технічної реалізації та стабільноті імовірнісних

характеристик генераторів псевдовипадкових чисел, дозволив стверджувати те, що відомі методи генерування характеризуються або складністю технічної реалізації, або низьким рівнем рівномірності розподілу, що визначає актуальність розробки нових методів генерування випадкових чисел. Слід відзначити, що останнім часом все більшої популярності набувають генератори псевдовипадкових чисел (ПВЧ). Генератори ПВЧ стали найважливішими елементами систем захисту, надійність останньої в значній мірі визначається саме властивостями використаних генераторів. Якісні генератори ПВЧ, будучи за своєю суттю детермінованими, мають проте практично всі властивості реалізацій істинно випадкових процесів і успішно замінюють їх, оскільки випадковим числам складно забезпечити необхідні статистичні характеристики [1, 2].

Важливим класом псевдовипадкових послідовностей є послідовності, які формуються генераторами на основі регістрів зсуву з лінійними зворотними зв'язками. Основними перевагами таких генераторів є: простота апаратної і програмної реалізації; висока швидкодія; достатньо високі статистичні властивості сформованих послідовностей; можливість побудови на їх основі генераторів, що формують послідовність довільної довжини або послідовність псевдовипадкових чисел з довільним законом розподілу.

На основі проведеного аналізу складності технічної реалізації методів псевдовипадкового генерування як один із ефективних запропоновано метод на базі використанням незвідних поліномів над полем Галуа $GF(2)$ [3]. Формування n -роздрядних псевдовипадкових чисел (c_1, c_2, \dots, c_n) в двійковій системі числення здійснюється на основі циклічного зсуву початкової послідовності (b_1, b_2, \dots, b_n), утворюючи послідовність (b_2, b_3, \dots, b_0), причому елемент b_0 є сумою за модулем 2 добутків відповідних елементів послідовності b_1, b_2, \dots, b_n та маски a_1, a_2, \dots, a_n , утвореної коефіцієнтами незвідного полінома над полем Галуа. Отже,

$$c_1 = b_2, c_2 = b_3, \dots, c_n = \left(\sum_{i=1}^n b_i a_i \right) mod 2. \quad (1)$$

Всі n -роздрядні числа псевдовипадкової послідовності трансформують у відліки десяткової системи числення. Даний метод названо *методом генерування Галуа на основі циклічних зсувів*, що легко апаратно реалізується на регістрах зсуву. Перевагою даного методу є простота технічної реалізації даного генератора з допомогою регістрів зсуву, що є суттєвою перевагою у застосуванні даного генератора для методу статистичного моделювання Монте-Карло, зокрема для аналого-цифрового перетворення Монте-Карло [3].

Для аналого-цифрового перетворювача (АЦП) Монте-Карло на періоді перетворення (області інтегрування) сформують 2^n значень послідовності псевдовипадкових чисел і відповідно здійснюють 2^n порівнянь, підраховують кількість одиниць результату порівнянь, що є пропорційна інтегралу функції аналогового значення вхідного сигналу перетворення, та здійснюють подальше інтегрування значення вхідного параметру на наступній області інтегрування. Даний тип АЦП відповідає за швидкодією та простотою технічної реалізації розгортаючому АЦП, проте зі значно вищою точністю, яка досягається внаслідок застосування методу Монте-Карло. Одним зі складових елементів АЦП, що визначає точність даного пристрою, є генератор псевдовипадкових чисел. Якщо використання генератора Галуа на основі циклічних зсувів забезпечує простоту технічної реалізації, то постає питання дослідження статистичних характеристик послідовності псевдовипадкових чисел даного методу генерування.

Мета статті – дослідження статистичних характеристик послідовностей псевдовипадкових чисел, що сформовані генератором Галуа на основі циклічних зсувів за допомогою пакету тестів Diehard.

Дослідження послідовностей псевдовипадкових чисел. На сьогоднішній день розроблено безліч методів тестування псевдовипадкових послідовностей. Всі методи тестування генераторів ПВЧ можна розділити на три групи: евристичні, графічні і статистичні. До евристичних тестів належать: перевірка швидкості формування чисел, перевірка періоду, тест на точність визначення деяких констант методом Монте-Карло, перевірка на криптостійкість. Дані тести дають відносну оцінку послідовностям випадкових чисел. Графічні тести (автокореляційна функція, спектральний тест, рівномірність розподілу чисел і ін.) відображають результати у вигляді гістограм і графіків, що характеризують властивості досліджуваної послідовності, але не дають кількісної оцінки (рис. 1). Статистичні ж тести дають можливість виконати чисельну оцінку якості послідовності ПВЧ. Статистичні тести зазвичай об'єднуються в пакети тестування (серед них можна виділити тести DIEHARD, тести NIST та ін.).

На рис. 1 графічно зображене розподіл точок послідовності псевдовипадкових чисел, генерованих методом Галуа на циклічних зсувах на площині (а) та в просторі (б).

Особливу роль в тестуванні генераторів ПВЧ зіграли роботи Джорджа Марсалі і Дональда Кнута, які запропонували цілий набір тестів. Ще одним стандартним набором тестів послідовностей ПВЧ є стандарт NIST STS 800-22 Національного інституту стандартизації і технологій NIST.

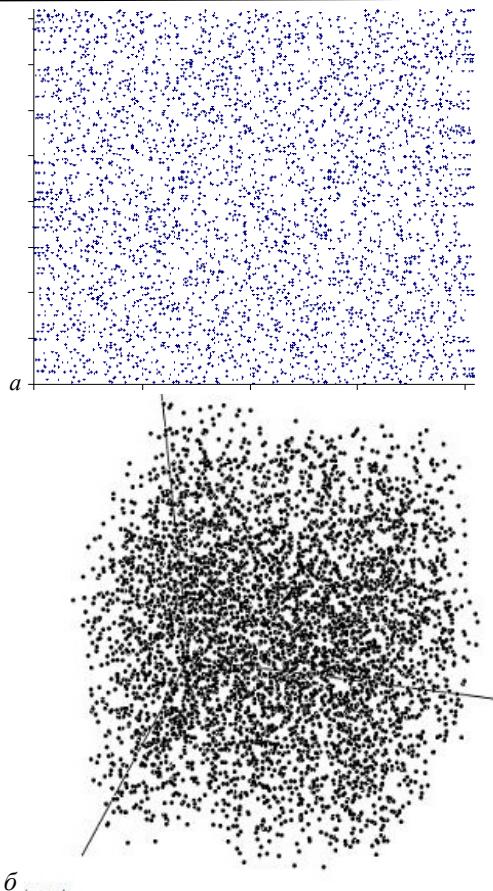


Рис. 1. Розподіл 12-роздрядних відліків, генерованих методом Галуа:
а – на площині; б – в просторі

Перевагою тестів Д. Кнута є існування швидких алгоритмів виконання; недоліком є невизначеність у трактуванні результатів та відсутнія програмна реалізація. Послідовність ПВЧ, що сформовані запропонованим генератором Галуа на основі циклічних зсувів, досліджено тестами Д. Кнута і результати опубліковані в [4, 5]. Результати використання пакету NIST STS, основною перевагою якого є однозначна інтерпретація результатів, подані в роботі [6]. Результати проведених досліджень на визначення типу розподілу послідовності псевдовипадкових чисел генерованих зазначеним методом Галуа показали високу якість рівномірності розподілу.

Одним з статистичних критеріїв є оцінка помилки відтворення закону розподілу дискретної випадкової величини. При тестуванні генераторів ПВЧ необхідно використати якомога більшу кількість відомих статистичних критеріїв, відшуковуючи в послідовності ПВЧ всі можливі закономірності. В даній статті подано результати дослідження

генератора Галуа за допомогою пакету статистичних тестів DIEHARD [7 – 9]. Diehard це набір статистичних тестів для вимірювання якості набору випадкових чисел, який розглядають як один з найбільш строгих існуючих наборів тестів. Слід відзначити і недоліки даного програмного продукту: нема детального опису тестів і методики трактування їх результатів, більшість тестів є евристичними, проходження тесту має тільки два значення "так" або "ні". Тести Diehard формують на виході числа *p*-значення, які рівномірно розподілені в інтервалі [0; 1], якщо вхідний потік чисел дійсно випадковий. Є 13 тестів в пакеті Diehard, деякі з них повторюються з різними параметрами і вони видають 181 *p*-значення в цілому. Оскільки у деяких тестах використовувались декілька наборів параметрів, тому обчислювалось середнє арифметичне для цього тесту усіх поданих *p*-значень. Результати проведеного тестування подано в таблиці.

Таблиця

Результати статистичного дослідження за допомогою пакету Diehard

<i>№</i>	<i>Назва тесту</i>	<i>Усереднені <i>p</i>-значення</i>	<i>K-стъ отрима- них <i>p</i>-значень</i>
1	Дні народження (Birthday Spacings)	0,612331	9
2	Перестановки, що перетинаються (Overlapping Permutations)	0,067450	2
3	Ранги матриць (Ranks of matrices)	0,503214	27
4	Потік бітів (The bitstream test)	0,393214	20
5	Мавпячі тести (Monkey Tests)	0,450123	32
6	Підрахунок одиничок (Count the 1's)	0,382041	27
7	Тест на парковку (Parking Lot Test)	0,630916	10
8	Тест на мінімальну відстань (Minimum Distance Test)	0,563491	20
9	Тест випадкових сфер (Random Spheres Test)	0,110556	20
10	Тест стискання (The Squeeze Test)	0,400146	1
11	Тест сум, що перетинаються (Overlapping Sums Test)	0,856011	10
12	Тест послідовностей (Runs Test)	0,431583	2
13	Тест гри в кости (The Craps Test) (for no. Of wins/ for throws/game)	0,902469	1

Розподіл усіх *p*-значень має бути рівномірним на одиничному інтервалі. Відхилення від рівномірного розподілу показують, що деякі з виявлених Diehard випробувань не цілком задовольняють умову тесту. Після сортування отриманих *p*-значень, побудовано графік, що показує

відхилення від $X = Y$ діагональної лінії отриманих p -значень (рис. 2). За допомогою дисперсії можна обчислити повне відхилення вибірки, але в контексті даної статті дані обчислення не проводились; p -значення поблизу 0 або 1 вказують на відхилення від нормального розподілу. Зокрема слід зауважити, що деякі тести мали досить велику кількість параметрів і їх значення можна вважати вагомішими за інші (а саме тести під номером № 3 – 6, № 7, 8).

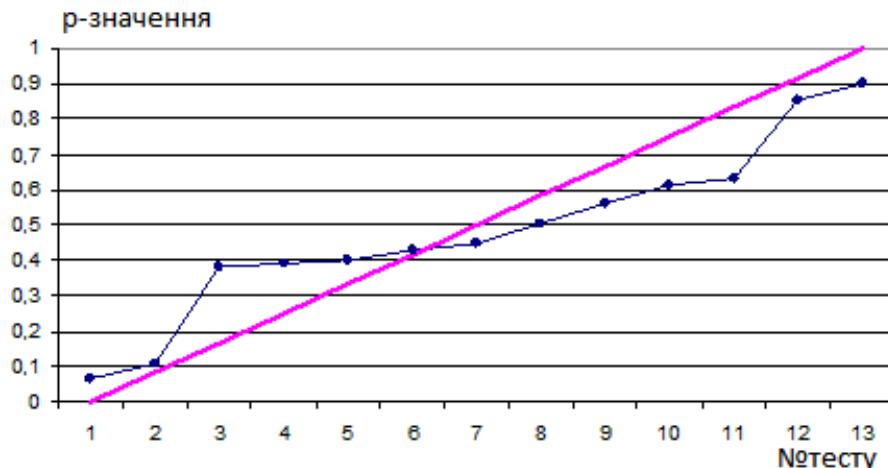


Рис. 2. Відхилення p -значення від лінії $X = Y$

Для того, щоб мати більш чітке уявлення про отримані результати, використано позначення областей на діапазоні $[0, 1]$, де p -значення розподілені. Весь цей діапазон поділено на три області: безпечна зона, сумнівна зона, зона невдачі. Ці ділянки були визначені наступними нерівностями:

$0 < p\text{-значення} \leq 0.1$ або $0.9 \leq p\text{-значення} \leq 1$ – попадання в зону невдачі;

$0.1 < p\text{-значення} \leq 0.25$ або $0.75 \leq p\text{-значення} < 0.9$ – попадання в сумнівну зону;

$0.25 < p\text{-значення} < 0.75$ – попадання в безпечну зону (рис. 3).

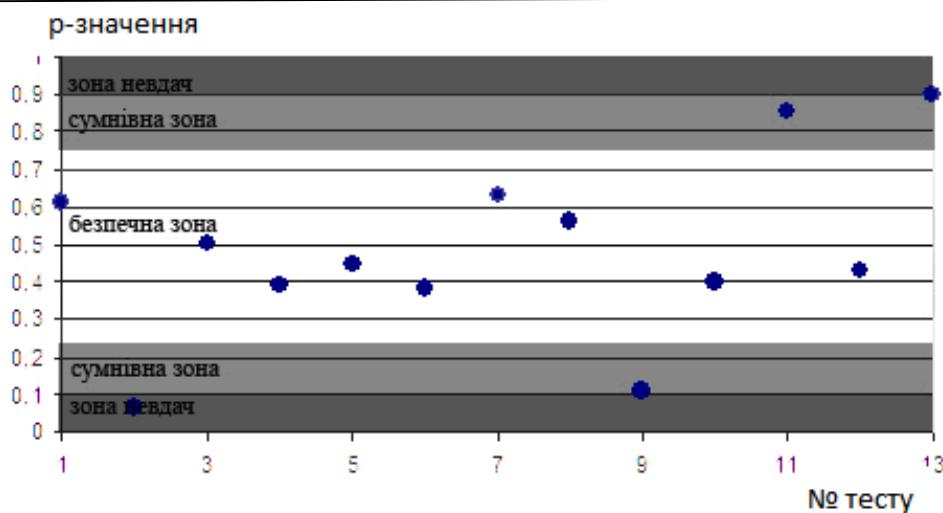


Рис. 3. Області розподілення отриманих p -значень

Наявність великої кількості p -значення в безпечній зоні вказує на те, що протестований зразок близький до хаотичності; p -значення в зоні невдачі є показником відхилення від випадковості, проте їх кількість досить мала для досліджуваного генератора псевдовипадкових чисел.

Висновки. Проведено дослідження статистичних характеристик генерованих послідовностей за допомогою пакету статистичних тестів Diehard. Результати проведених досліджень на визначення типу розподілу послідовності псевдовипадкових чисел, генерованих зазначеним методом, показали високу якість випадковості отриманих чисел. Рівномірність розподілу сформованих послідовностей псевдовипадкових чисел вказує на ефективність використання даного генератора в складі аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло. Використання методу генерування псевдовипадкових чисел Галуа на основі циклічних зсувів дозволить регуляризувати структуру аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло, підвищити швидкодію та технологічність виробництва і зменшити вартість продукту.

Список літератури: 1. Иванов М.А. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей / М.А. Иванов, И.В. Чугунков. – М.: Кудиц – Образ, 2003. – 240 с. 2. Donald Knuth The Art of Computer Programming, Seminumerical Algorithms / K. Donald. – Volume 2, 3rd edition, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1998. – 761 р. 3. Петришин Л. Б. Теоретичні основи перетворення форми та цифрової обробки інформації / Л. Б. Петришин. – К.: ІЗiМН МОУ, 1997. – 272 с. 4. Лаврів М. В. Аналіз ефективності застосування методів генерування сигналів з псевдовипадковим розподілом у системах статистичних досліджень / М.В. Лаврів, Л.Б. Петришин // Наукові вісті інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – Івано-Франківськ. – 2007. – № 2 (12). – С. 61-66. 5. Лаврів М.В. Генератори рівномірно розподілених псевдовипадкових величин / М.В. Лаврів, Л.Б. Петришин // Вісник Прикарпатського національного університету. Фізика. – 2007. – Вип. 3. – С. 112-118.

6. Лаврів М.В. Методи і засоби генерування псевдовипадкових сигналів із рівномірним розподілом та аналіз результатів дослідження їх статистичних характеристик / М.В. Лаврів, Л.Б. Петришин // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. – 2009. – № 2 (15). – С. 56-62. **7.** Mohammed M. Alani Testing Randomness in Ciphertext of Block-Ciphers Using DieHard Tests / M. Alani Mohammed // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – 2010. – Vol. 10. – № 4. – P. 37. **8.** Dirk Eddelbuettel, Physics, Duke University RDieHarder: An R interface to the DieHarder suite of Random Number Generator Tests, Initial Version as of May 2007, Rebuilt on February 20, 2014 using RDieHarder 0.1.3. **9.** George Marsaglia, DIEHARD Statistical Tests: <http://stat.fsu.edu/~geo/diehard.html>.

References:

1. Ivanov, M.A. and Chuhunkov, I.V. (2003), *Theory, Application and evaluation of quality generators pseudorandom sequences*, Kudys, Moscow, 240 p.
2. Knuth, D. (1998), *The Art of Computer Programming, Seminumerical Algorithms*, Vol. 2, 3rd edition, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 761 p.
3. Petryshyn, L.B. (1997), *Theoretical Foundations of converting forms and digital processing*, IZiMN, Kyiv, 240 p.
4. Lavriv, M.V. and Petryshyn, L.B. (2007), "Analysis of the effectiveness of methods of generating pseudo-random signal distribution systems in statistical studies", *Scientific Institute of Management and Economics "Galician Academy"*, Vol. 2 (12), pp. 61-66.
5. Lavriv, M.V. and Petryshyn, L.B. (2007), "Generators uniformly distributed pseudorandom values", *Bulletin Carpathian National University. Physics*. Vol. 3, pp. 112-118.
6. Lavriv, M.V. and Petryshyn, L.B. (2009), "Methods and means for generating a pseudorandom signal with uniform distribution and analysis of the survey results of the statistical characteristics", *Information technologies and computer engineering*, Vol. 2 (15), pp. 56-62.
7. Mohammed, M.A. (2010), "Testing Randomness in Ciphertext of Block-Ciphers Using DieHard Tests", *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 10, No. 4.
8. Eddelbuettel, D. (2014), *RDieHarder: An R interface to the DieHarder suite of Random Number Generator Tests*, Initial Version as of May 2007, Rebuilt on February 20, 2014 using RDieHarder 0.1.3.
9. Marsaglia, G. (1999), "DIEHARD Statistical Tests", available at: <http://stat.fsu.edu/~geo/diehard.html>.

Надійшла (received) 31.03.2016

Статью представил д-р физ.-мат наук, проф. Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника Пилипів В.М.

Semankiv Maria, Cand. Sci. Tech.
Associate Professor at the Department of Computer Science
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Str. Shevchenko, 57, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018
Tel.: (095) 469 38 58; e-mail: dlyamarii@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-1314-8923

УДК 519.6

Оцінка статистичних характеристик систем випадкових чисел / Семаньків М. В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 109 – 117.

Подано результати дослідження статистичних характеристик послідовностей псевдовипадкових чисел, що утворені методом Галуа на основі циклічних зсувів, за допомогою пакету статистичних тестів Diehard. Відзначено ефективність використання даного типу генератора в складі аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: псевдовипадкові числа, оцінка статистичних характеристик систем випадкових чисел, пакет статистичних тестів Diehard.

УДК 519.6

Оценка статистических характеристик систем случайных чисел / Семанькив М. В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 109 – 117.

Представлены результаты исследования статистических характеристик последовательностей псевдослучайных чисел, образованных методом Галуа на основе циклических сдвигов, с помощью пакета статистических тестов Diehard. Отмечена эффективность использования данного типа генератора в составе аналого-цифрового преобразователя Монте-Карло. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: псевдослучайные числа, оценка статистических характеристик систем случайных чисел, пакет статистических тестов Diehard.

UDC 519.6

Assessment of statistical properties random numbers / Semankiv M. V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 109 – 117.

Study the statistical characteristics of sequences of pseudorandom numbers is presented. Numbers have been formed by Galois through cyclic shifts. Research have been conducted using statistical tests Diehard package. Efficiency of this type of generator for analog-to-digital converter Monte Carlo have been confirmed. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: pseudorandom numbers, assessment of statistical properties random numbers, statistical tests Diehard package.

С.Г. СЕМЕНОВ, д-р техн. наук, с.н.с., зав. каф., НТУ "ХПИ",
С.Ю. ГАВРИЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
В.В. ЧЕЛАК, студент, НТУ "ХПИ"

РАЗРАБОТКА ШАБЛОНОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ BDS-ТЕСТИРОВАНИЯ

В статье разработаны шаблоны фиксации аномального поведения компьютерных систем на основе BDS-тестов. Разработана имитационная модель, при этом ее входными данными стали показатели загрузки центрального процессора, оперативной памяти и их соотношения. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности использования разработанных шаблонов фиксации аномального поведения компьютерных систем на основе BDS-тестирования в эвристических анализаторах систем обнаружения вторжений. Ил.: 2. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: компьютерные системы, шаблоны фиксации аномального поведения, BDS-тест.

Постановка проблемы. Одна из главных причин потерь компьютерной информации в наше время связана с деятельностью вредоносных программ. На протяжении года вирусы наносят убытки на десятки миллиардов долларов и еще, приблизительно столько же, составляют непрямые убытки, связанные с разработкой программного обеспечения и проведения других мероприятий защиты от вирусов.

При решении задач, связанных с диагностикой и защитой компьютерных информационных ресурсов, центральной является задача оперативного выявления аномального поведения компьютерных систем (КС) в условиях вирусных атак.

Известно, что в настоящее время для решения сложной задачи антивирусной защиты данных используется множество специализированных антивирусных программ, в основу которых, чаще всего, входят сигнатурные и эвристические анализаторы.

Эвристические анализаторы, как правило, включают в себя интеллектуальные подсистемы, базирующиеся на теории искусственного интеллекта, например, на основе методов нечеткой логики, кластерного анализа, согласованных эвристик или теории нейронных сетей. В то же время все они основаны на предположении, что для КС существует свой шаблон нормального поведения и любые значительные отклонения от него могут быть обусловлены воздействием злоумышленников. Именно поэтому очень важной задачей является выбор или формирование такого шаблона, который бы воспроизводил функциональный портрет КС и

фиксировал аномальное ее поведение с заданной точностью.

Анализ литературы показал, что для обнаружения аномалий в управлении производством, бизнес-процессами широко используют метод контрольных карт. Для построения шаблона нормальной работы системы применяются контрольные карты Шухарта [1], EWMA [2] и CUSUM [3], которые используют в качестве входных данных набор показателей, характеризующий работу системы. Кроме этого, для уточнения полученных результатов дополнительно могут использоваться методы статистической обработки данных (например, BDS-тестирование [4]).

Однако, как показали исследования, приведенные средства формирования шаблонов не лишены ряда недостатков. Так, например, контрольные карты EWMA нечувствительны к коротким проявлениям аномалий. В то же время карты CUSUM обнаруживают небольшие, но постоянные изменения с большей вероятностью, но обладают низкой точностью (высокой вероятностью ложных срабатываний) в случае динамических изменения показателей КС. Устранить это противоречие можно разработкой адаптивных шаблонов фиксации аномального поведения КС [5 – 9].

Таким образом, проведенный анализ существующих подходов антивирусной защиты данных показал необходимость адекватного выбора показателя аномального поведения компьютерных систем в условиях внешних воздействий и разработки критерия оценки, соответствующего выбранному показателю.

Цели статьи. Разработка новых шаблонов фиксации аномального поведения компьютерных систем.

Результаты разработки и исследований. Одним из перспективных направлений параметрического анализа является *BDS*-тестирование. *BDS*-тесты, предложенные в результате анализа финансовых рынков экономистами Броком, Дечертом и Шейнкманом (B. Brock, W. Dechert и J. Scheinkman) в 1987 году [4], и названные первыми буквами их фамилий, представляют собой эффективные методы выявления зависимостей во временных рядах в рамках их нелинейного анализа. Их цель состоит в том, чтобы различить данные I.I.D. (independent and identically distributed random variables) и любой вид зависимости – проверить нулевую гипотезу H_0 о независимости и тождественном распределении значений временного ряда $\vec{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$, используя для этого критерий значимости. Согласно этому критерию для принятия гипотезы H_0 необходимо выбрать критическую область G_α , удовлетворяющую условию $P(g \in G) = \alpha$, где

$g(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ – статистика наблюдения, а α – устанавливаемый уровень значимости.

Из [2 – 5] известно, что BDS-тест основан на статистической величине $w(\bar{\xi})$ (BDS-статистике):

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (1)$$

где $C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$ – числитель BDS-статистики, определяется корреляционными интегралами $C_{m,N}(\varepsilon)$, $C_{1,N-m}(\varepsilon)$ для выборки размера m ; N – число элементов временного ряда; ε – радиус гиперсферы; $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ – среднеквадратичное отклонение разницы $C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$.

Корреляционный интеграл определяет частоту попадания произвольной пары точек фазового пространства в гиперсферы радиуса ε :

$$C_{m,N}(\varepsilon) = \frac{2}{(N-m+1)(N-m)} \sum_{s=1}^{N-m} \left[\sum_{t=s+1}^{N-m+1} I(\|x_s^m - x_t^m\|) \right], \quad (2)$$

где $I(x)$ – функция Хевисайда:

$$I(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } |x| < \varepsilon, \\ 0, & \text{если } |x| \geq \varepsilon. \end{cases} \quad (3)$$

На параметры наложено ограничение, которое обосновано в ряде работ [3 – 6]:

$$\begin{aligned} \frac{N}{m} &> 200, \\ \varepsilon &\in [0.5\sigma; \sigma], \\ I &< m < 6. \end{aligned} \quad (4)$$

BDS-тест оценивает степень хаотичности процесса. Критерием хаотичности является значение BDS-теста $|w_{m,N}(\varepsilon)| \leq 1,96$.

Основные положения математической формализации технологии BDS-тестирования в приложении к средствам защиты информации в компьютерных системах представлены в работах [6, 7, 10]. В то же время проведенные исследования показали, что данный критерий не отражает в полной мере результаты влияния вирусных атак на указанные выше статистические показатели.

Для выявления возможности и особенностей идентификации состояния компьютерной системы в условиях вирусных атак была разработана имитационная модель, при этом ее входными данными стали показатели загрузки центрального процессора (CPU), оперативной памяти (RAM) и их соотношения (CPU/RAM).

Модель предусматривает вариацию N – количества значений временного ряда. Значение загрузки центрального процессора сканируется ежесекундно и сохраняется в файле.

Полученные входные значения делятся на выборки по 500 значений и подаются на вход модуля анализа, который обрабатывает и анализирует данные с помощью BDS-статистики. Результатом работы программной модели является $N/500$ значений BDS-теста.

Результаты значений BDS-теста для различных режимов работы системы приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значение BDS-теста для CPU для различных режимов работы системы
(Режим 1 – 3 – нормальный, режим 4 – 6 – аномальный)

№	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6
1	65,21	43,52	39,96	118,36	111,01	123,48
2	54,99	37,01	61,29	125,29	111,91	124,40
3	69,00	33,48	58,69	121,47	115,77	128,57
4	45,79	32,54	63,28	128,35	106,62	126,56
5	47,77	35,61	67,71	127,48	107,01	120,21
6	57,56	35,90	31,22	132,91	116,64	123,20
7	53,09	31,57	39,45	118,33	116,39	125,92
8	58,90	33,52	30,59	121,68	106,37	118,73
9	55,37	32,69	59,65	126,96	115,65	131,17
10	47,00	29,10	37,32	126,53	122,42	126,90
11	54,30	36,03	74,86	129,36	109,71	125,36
12	61,08	33,02	78,90	121,95	115,07	124,70
13	64,67	33,74	50,71	123,23	120,42	124,27
14	77,21	33,53	47,54	124,03	124,04	127,29
15	63,21	33,98	60,51	128,04	110,60	128,06
16	74,44	33,62	63,08	125,51	106,29	120,96
17	69,00	33,62	40,45	130,00	109,14	127,33
18	78,65	34,05	52,90	120,23	135,82	122,89
19	71,35	35,28	64,42	129,21	107,72	125,22
20	83,52	38,56	50,96	126,01	112,70	126,42
Максимум	83,52	43,52	78,90	132,91	135,82	131,17
Минимум	45,79	29,10	30,59	118,33	106,29	118,73
Джиттер	45,17	33,14	61,22	10,97	21,74	9,49

Таблица 2

Значение BDS-теста для RAM для различных режимов работы системы
(Режим 1 – 3 – нормальный, режим 4 – 6 – аномальный)

№	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6
1	1759,37	58,84	24,59	124,84	122,90	154,51
2	39,64	NaN	NaN	115,27	123,62	148,61
3	25,10	162,80	NaN	131,08	127,82	127,92
4	24,85	35,33	23,11	125,95	119,98	132,04
5	31,14	50,62	NaN	130,82	132,75	140,54
6	23,78	29,17	218,81	122,32	131,80	139,37
7	25,49	69,34	24,02	133,17	122,93	138,76
8	48,90	22,63	72,14	132,47	129,44	129,27
9	37,77	25,60	33,71	128,40	127,81	157,65
10	68,83	25,22	40,69	122,85	132,47	137,09
11	38,91	23,83	NaN	126,75	125,95	137,26
12	174692,2	25,10	NaN	115,78	130,27	124,14
13	22,54	NaN	NaN	131,62	120,49	146,72
14	NaN	28,81	NaN	129,42	117,26	133,25
15	NaN	739,18	99,26	119,00	134,34	154,16
16	NaN	NaN	NaN	133,98	126,01	162,38
17	265,53	694,42	NaN	141,87	137,98	134,82
18	46,15	61,28	NaN	117,88	121,37	139,48
19	3578,07	NaN	NaN	152,63	119,82	130,03
20	NaN	NaN	NaN	140,44	131,09	157,72
Максимум	NaN	739,18	218,81	152,63	137,98	162,38
Минимум	22,54	22,63	23,11	115,27	117,26	124,14
Джиттер	99,99	96,94	89,44	24,48	15,01	23,55

Примечание: NaN – значение стремится к бесконечности.

Проанализированы 10000 посекундных значений числового ряда, размер выборки $N = 500$, $m = 2$ ($N / m > 200$) при нормальном режиме работы и в случае заражения системы компьютерным вирусом.

График значений BDS-теста для CPU при нормальной и аномальной работе приведен на рис. 1, 2.

Если проанализировать разброс значений BDS-теста CPU при нормальном режиме работы системы (рис. 1 или табл. 1), то видно, что джиттер (процент отношения разницы между максимальным и минимальным значением к максимальному значению) для режимов 1 – 3 составляет 45,17%; 33,14%; 61,22% соответственно.

Анализ разброса значений BDS-теста CPU при аномальной работе системы (рис. 2 или табл. 1), показывает уменьшение джиттера. Джиттер для аномальной работы системы для режимов 4 – 6 составляет 10,97%; 21,74%; 9,49% соответственно.

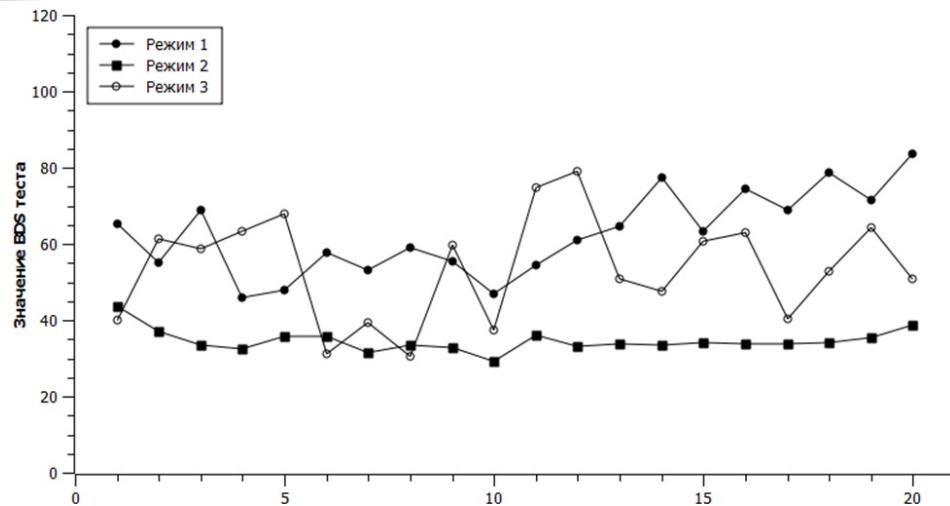


Рис. 1. График значений BDS-теста для CPU при нормальной работе системы

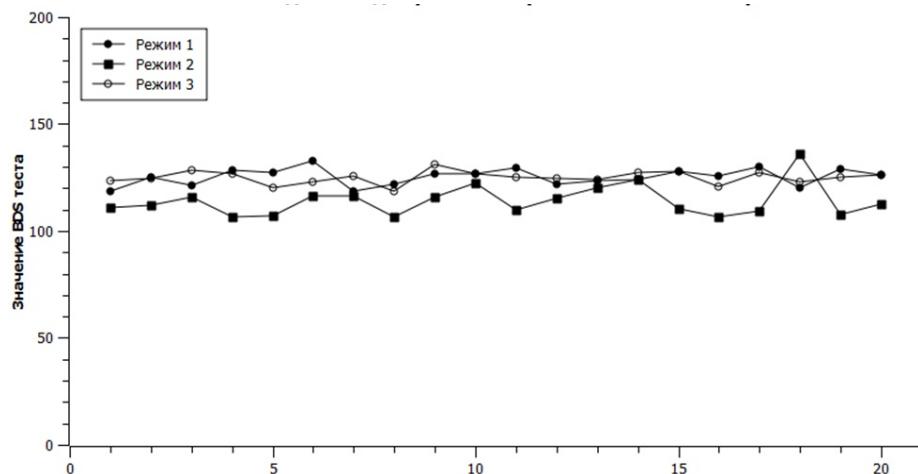


Рис. 2. График значений BDS-теста для CPU при аномальной работе системы

Вместе с тем, предыдущие исследования [10] показали, что значение BDS-статистики CPU при заражении системы вирусом fork-бомбой (программа, бесконечно создающая свои копии за счет системного вызова функции fork() и вызывающая полную загрузку процессора) стремится к 100%.

Если проанализировать разброс значений BDS-теста RAM при нормальном режиме работы системы (табл. 2), то видно что разброс параметров резко возрастает и стремиться к 100%. При аномальном

режиме работы системы (значение джиттера резко падает и находится в пределах [0% – 25%].

Аналогичные результаты значений BDS-теста получены для соотношения CPU/RAM. Значения BDS-теста для нормальной и аномальной работы системы и находятся в пределах [25% – 75%] и [0% – 25%] соответственно.

Выводы. В работе разработаны шаблоны фиксации аномального поведения компьютерных систем на основе BDS-тестирования. Для идентификации состояния компьютерной системы в условиях вирусных атак была разработана имитационная модель, при этом ее входными данными стали показатели загрузки центрального процессора, оперативной памяти и их соотношения.

Экспериментальные исследования показали, что критерием оценки нормального состояния компьютерной системы является значений BDS-теста для входных данных в интервале [25% – 75%].

Воздействие вирусов на компьютерную систему приводит к резкому снижению джиттера значений BDS-теста. Критерием аномальности является значений BDS-теста для входных данных в интервале [0% – 25%].

Вместе с тем, значение BDS-теста (для CPU и RAM) может резко возрастать в случае заражения системы вирусом или в случае использования большего количества приложений. И в первом, и во втором случае, это может быть аномальным и потребовать принятия дополнительных мер. Если причиной перегрузки CPU и RAM будет являться не вирус, то использование других методов защиты не обнаружит воздействия на компьютерную систему злоумышленного программного обеспечения.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности использования разработанных шаблонов фиксации аномального поведения компьютерных систем на основе BDS-тестирования в эвристических анализаторах систем обнаружения вторжений в совокупности или каждый по отдельности.

Список литературы: 1. Контрольні карти Шухарта. ДСТУ ISO 8258–2001 [Электронной ресурс]. – Режим доступу: http://gost-snip.su/document/dstu_iso_82582001_statistichnii_kontrol_kontrolni_karti_shuh. 2. Общие сведения о картах кумулятивных сумм. [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2011/fimm/merkulov/library/translate.htm>. 3. Карты контроля качества. [Электронной ресурс]. – Режим доступу: <http://www.statssoft.ru/home/textbook/modules/stquacon.html>. 4. Brock W.A. Test for independence based on the correlation dimension / W. Brock, W. Dechert and J. Scheinkman. – Working Paper, University of Wisconsin, 1987. 5. Касперский К. Записки исследователя компьютерных вирусов / К. Касперский. – СПб.: Питер, 2006. – 316 с. 6. Шелухин О.И. Обнаружение вторжений в компьютерные сети / О.И. Шелухин, Д.Ж Сакалема, А.С. Филинова. – М.:

Горячая линия – Телеком, 2013. – 220 с. 7. Семенов С.Г. Защита данных в компьютеризированных управляющих системах (монография) / С.Г. Семенов, В.В. Давыдов, С.Ю. Гавриленко. – "LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING" Германия, 2014. – 236 с. 8. Порошин С.М. Разработка и исследования математической модели компьютеризированной информационно-измерительной управляющей системы критического применения с учетом фактора внешних воздействий / С.М. Порошин, С.Г. Семенов // Системи обробки інформації. – Харків: ХУ ПС. – 2013. – Вип. 2 (110). – С. 208-210. 9. Лукацкий А.В. Обнаружение атак / А.В. Лукацкий. – Спб: ВХВ-Петербург, 2001. – 624 с. 10. Семенов С.Г. Методы контроля и идентификации состояния компьютерных систем на основе BDS-тестирования / С.Г. Семенов, С.Ю. Гавриленко // Proceedings of the symposium "Metrology and metrology assurance"—Sozopol, Bulgaria, 2015. – С. 400-405.

References:

1. Shewhart control charts. DSTU ISO 8258-2001, available at: http://gost-snip.su/document/dstu_iso_82582001_statistichnii_kontrol_kontrolni_karti_shuh.
2. General information about the maps of cumulative sums, available at: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2011/fimm/merkulov/library/translate.htm>.
3. *Quality Control Charts*, available at: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stquacon.html>.
4. Brock W. and Dechert W. and Scheinkman. A., (1987), *Test for independence based on the correlation dimension*. Working Paper, University of Wisconsin, 289 p.
5. Kaspersky K., (2006), *Notes of a computer virus researcher*, Peter, St. Petersburg, 316 p.
6. Shelukhin O.I. and Sakalema D.J. and Filinova A.S. (2013), *Intrusion Detection in Computer Networks*, Hotline-Telecom, Moscow, 220 p.
7. Semenov. S.G. and Davydov V.V. and S.Y. Gavrilenco (2014), *Data protection in computerized control systems*, Ed. "LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING", Germany, 236 p.
8. Poroshin S.M. and Semenov S.G. (2013), "Development and research of mathematical models of the computerized information measurement control system, is taking into account factors external influences", *Information processing systems, HU PS*, Kharkov, Vol. 2 (110), pp. 208-210.
9. Lukatskii A.V (2001), *Intrusion Detection*, HCS-Petersburg, St. Petersburg, 624 p.
10. Semenov S.G. and Gavrilenco S.Y. (2015), "Methods of control and identification of state computer systems based on the BDS-test", Proceedings of the symposium "Metrology and metrology assurance", Sozopol, Bulgaria, pp. 400-405.

Надійшла (received) 12.04.2016

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

Semenov Sergei, Dr. Sci. Tech.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-01-65, e-mail: s_semenov@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-4472-9234

Gavrilenko Svitlana, Cand. Sci. Tech.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002

Tel.: (057) 707-01-65, e-mail: gavrilenko08@gmail.com
ORCID ID: 0000-0006-4561-8368

Chelack Victor, Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-01-65, e-mail: Victor.Chelak@gmail.com
ORCID ID: 0000-0006-4561-8368

УДК 004.732.056

Розробка шаблонів ідентифікації стану комп'ютерних систем на основі BDS-тестування / Семенов С.Г., Гавриленко С.Ю., Челак В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 118 – 127.

У статті розроблені шаблони фіксації аномальної поведінки комп'ютерних систем на основі BDS-тестів. Розроблено імітаційну модель, при цьому її вхідними даними стали показники завантаження центрального процесора, оперативної пам'яті і їх співвідношення. Отримані результати досліджень дозволяють зробити висновок про можливість використання розроблених шаблонів фіксації аномального поведінки комп'ютерних систем на основі BDS-тестування в евристичних аналізаторах систем виявлення вторгнень. Іл.: 2. Табл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: комп'ютерні системи, шаблони фіксації аномальної поведінки, BDS-тест.

УДК 004.732.056

Разработка шаблонов идентификации состояния компьютерных систем на основе BDS-тестирования / Семенов С.Г., Гавриленко С.Ю., Челак В.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 118 – 127.

В статье разработаны шаблоны фиксации аномального поведения компьютерных систем на основе BDS-тестов. Разработана имитационная модель, при этом ее входными данными стали показатели загрузки центрального процессора, оперативной памяти и их соотношения. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности использования разработанных шаблонов фиксации аномального поведения компьютерных систем на основе BDS-тестирования в эвристических анализаторах систем обнаружения вторжений. Ил.: 2. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: компьютерные системы, шаблоны фиксации аномального поведения, BDS-тест.

UDC 004.732.056

Design templates for identification state of computer systems are based on BDS-test / Semenov S.G, S. Yu. Gavrilenco, V.V Chelak // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 118 – 127.

In this paper are designed templates for fixing the anomalous behavior of the computer system based on BDS-test. The imitation model was developed and CPU load, memory and their ratio are input data for this model. The results suggest the possibility of using designed templates for fixing the anomalous behavior of computer systems based on the BDS-testing in the detection systems intrusion of the heuristic analyzers. Figs.: 2. Tabl.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: computer systems, templates for fixing anomalous behavior, BDS-test.

Г.И. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф., Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск,
О.П. ЮШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск,
А.А. ХОРИЩЕНКО, асс., Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск,
В.С. ТКАЧУК, студ., Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск,
А.И. ЛАПИК, студ., Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОСМИЧЕСКИХ РОБОТОВ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ "1С. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КОНСТРУКТОР"

Рассмотрен кинематический анализ механизма ходовой части робота в виде кривошипно-ползунного механизма с использованием пакета "1С: Математический конструктор". Это позволило моделировать в анимации движения звеньев механизма и наглядно изобразить векторы скоростей и ускорений точек звеньев. Ил.: 4. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: моделирование, кинематический анализ, векторы скоростей и ускорений, "1С: Математический конструктор", анимация, робот.

Постановка проблемы. Создание новых робототехнических систем в современном мире немыслимо без применения информационных технологий. Последние пол столетия информационные технологии активно развиваются как сами по себе, так и в применении к технике [1 – 9]. Применение математического моделирования при составлении кинематических схем, а также для наглядного изображения изменений величин и направлений векторов линейных скоростей и ускорений – очень важный момент в проектировании промышленных роботов (ПР) и роботов космического назначения [2, 3]. Здесь требуется не только большая вычислительная работа, но использование анимации для наглядного представления полученных результатов.

При синтезе механизма ходовой части робота составляется кинематическая схема, удовлетворяющая требуемым законам движения звеньев. В процессе синтеза решаются три основные задачи:

- выбор структуры, т.е. построение конструкции рычажного механизма, выбор размеров и форм звеньев;
- определение числа и вида кинематических пар, обеспечивающих требуемые законы движения звеньев;
- моделирование движений точек звеньев, наглядное представление на

экране дисплея изменения величин и направлений векторов скоростей и ускорений каждой точки звеньев за цикл работы с использованием программной среды. В настоящее время отсутствуют программные комплексы, обеспечивающие решение вышеуказанных задач, что требует их доработки с целью решения актуальных задач, возникающих при проектировании роботов.

Анализ литературы. Применение информационных технологий существенно изменило стиль проектирования механизмов ПР. В современном проектировании используют программные комплексы AUTOCad и Компас [4, 5]. В [4] изложена методика использования AUTOCad в решении задачи синтеза и анализа простейших рычажных механизмов, используемых в механизмах роботов различного назначения. Но в решении задач кинематического и силового анализа используется обычный графоаналитический метод. Здесь не достигнута цель наглядного представления движения звеньев механизма в цикле с использованием анимации. В программном комплексе Компас возможно применение анимации для наглядного представления движений звеньев, но только в случае пространственного движения. Анимация, позволяющая воспроизвести движение звеньев в плоскопараллельном движении, здесь невозможна [5].

Программирование движений звеньев с помощью языков высокого уровня, например, Fortran, требует дополнительных знаний, опыта и затрат времени на отладку программы [6]. Наглядного представления о траекториях движения точек звеньев на экране дисплея пошагово во времени данная программная среда не обеспечивает.

Система встроенных функций Mathcad позволяет легко выполнить дифференцирование, т.е. вычислить скорости и ускорения особых точек рычажных механизмов. Эти результаты позволяют оценить пределы досягаемости схвата и выбрать его траекторию движения. Наглядного анимационного представления траекторий движения точек звеньев и изменения величин и направления векторов скоростей и ускорений на экране дисплея во времени данная программная среда не обеспечивает [2, 3].

Программная среда "1С: Математический конструктор" [7] – творческая компьютерная среда, позволяющая создавать модели, объединяющие конструирование, динамическое исследование, анимационный эксперимент.

Прикладные программы, заложенные в "1С: Математический конструктор", позволяют рассчитать координаты точек, принадлежащих соединительным и ведомым звеньям рычажных механизмов. При этом основным является изменение обобщенной координаты, то есть угла поворота ведущего звена механизма [7]. Система встроенных функций "1С: Математический конструктор" позволяет не только вычислить скорости и ускорения особых точек рычажных механизмов по заданным траекториям их движения, но и выполнить анимацию движения звеньев. При моделировании процесса движения звеньев видна анимационная картина изменения траекторий,

величин и направлений векторов скоростей и ускорений точек звеньев механизмов. Эти результаты позволяют оценить пределы досягаемости схвата робота и выбрать допустимую траекторию его движения.

В связи с этим разработку метода кинематического анализа механизмов, являющихся ходовой частью промышленных и роботов космического назначения, целесообразно выполнять с использованием пакета прикладных программ "1С: Математический конструктор".

Цель статьи – расширение возможностей программного пакета "1С: Математический конструктор" для кинематического анализа механизмов промышленных и космических роботов и для создания анимации движений звеньев механизмов.

Общая часть. Для программного пакета "1С: Математический конструктор" разработана методика кинематического анализа роботов и создания анимации движения звеньев. Продемонстрируем ее на примере анализа кривошипно-шатунного механизма. При этом будем полагать, что известны законы движения начальных звеньев и кинематическая схема механизма. Жесткие звенья соединены между собой кинематическими парами, преимущественно V класса. Сообразно этой структуре и определяются кинематические характеристики. При этом моделирование движения точек звеньев, изменение их скоростей и ускорений во времени отображаются наглядно на дисплее компьютера.

На рис. 1 – 4 показано выполненное моделирование движения кривошипно-ползунного механизма в нескольких положениях. Крайнее начальное положение 1 механизма (рис. 1).

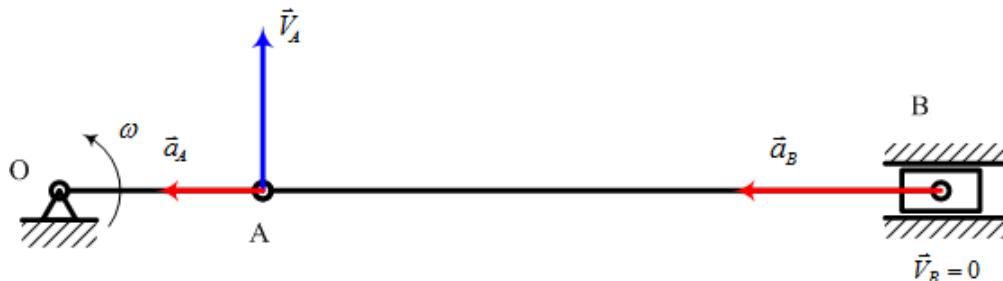


Рис. 1. Положение 1

При движении точки *A* по окружности скорость V_A постоянна, направлена в сторону вращения начального звена кривошипа. Скорость точки *B* обозначена V_B . В начальном положении (которое называется еще и "мертвым") эта скорость равняется 0.

Промежуточное положение 2 рабочего хода (см. рис. 2).

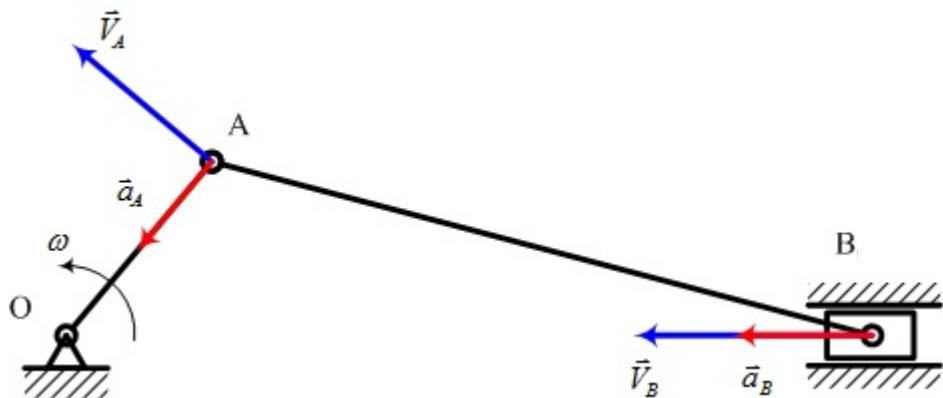


Рис. 2. Промежуточное положение 2

Скорость V_A постоянна, направлена в сторону вращения начального звена кривошипа. Скорость V_B , уже не равна 0, направлена вдоль движения ползуна. Ускорение a_B направлено влево и совпадает с направлением скорости V_B . Движение ползуна равноускоренное. Положение 3 конца рабочего хода (см. рис. 3).

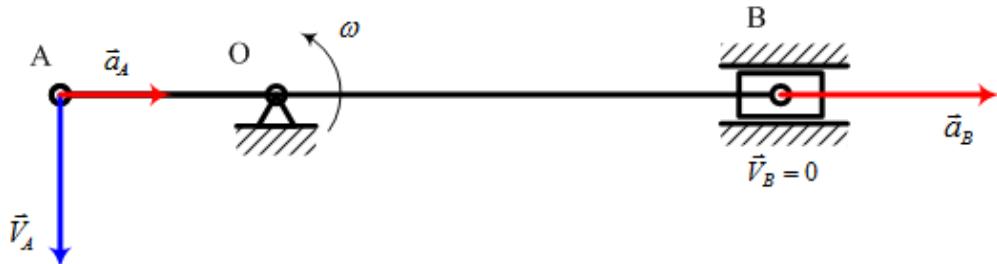


Рис. 3. Положение 3 конца рабочего хода

Скорость V_A постоянна. Скорость V_B в конечном положении (которое называется также "мертвым") равняется 0. Ускорение a_B направлено вправо и имеет максимальное по величине значение. Промежуточное положение 4 холостого хода (см. рис. 4).

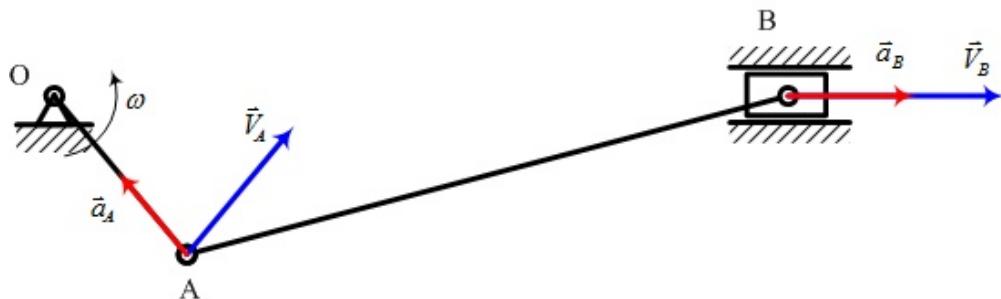


Рис. 4. Промежуточное положение 4 холостого хода

Скорость V_A постоянна. Скорость V_B , уже не равна 0, направлена вдоль движения ползуна. Ускорение a_B направлено влево и совпадает с направлением скорости V_B . Движение ползуна равноускоренное

Видно, что анимация позволяет наглядно продемонстрировать равноускоренные и равнозамедленные движения ползуна.

Выводы. Предложенная методика использования пакета прикладных программ "1С: Математический конструктор" позволяет применить ее при синтезе механизмов промышленных и космических роботов и эффективно решать задачи моделирования движений звеньев различных механизмов проектируемых изделий.

Список литературы: 1. Півняк Г.Г. Тлумачний словник з інформатики / Г.Г. Півняк, Б.С. Бусигін, М.М. Дівізінюк, О.В. Азаренко, Г.М. Коротенко, Л.М. Коротенко. – Дніпропетровськ: Нац. Гірнич. Ун-т, 2008. – 599с. 2. Ащепкова Н.С. Математическая модель движения космического аппарата с манипулятором / Н.С Ащепкова, Ю.Д. Шептун. Космічна наука та технологія. – 1997. – Т. 3. – № 5/6. – С. 34-42. 3. Ащепкова Н.С. Моделирование и кинематический анализ кривошипно-шатунного механизма / Н.С Ащепкова // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 23. – С. 53-60. 4. Сокол Г.І. Проектування плоских важільних механізмів з використанням AUTOCAD: Навч. посібник / Г.І. Сокол, В.С. Дудников – Дніпропетровськ: Поліграфія, 2014. – 208 с. 5. Слепова С.В. Система автоматизированного проектирования Компас-3D (мультидийный курс лекций) / С.В. Слепова, М.А. Шахина, Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 3-2. – С. 207-208. 6. Немнюгин С.А. Фортран в задачах и примерах / С.А. Немнюгин. – Петербург: БХВ, 2016. – 496 с. 7. Пакет прикладных программ "1С: Математический конструктор" [Электронная версия] <http://obr.1c.ru/educational/uchenikam/mathkit/>. 8. Голберг Б.Н. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с электрической трансмиссией / Б.Н. Голберг, С.В. Кондаков, Л.С. Носенко, О.О. Павловская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. Южно-Уральск: Южно-Уральский государственный университет. – 2012. – Т. 37 (296). – С. 73-81. 9. Stéphane Guérard. Turning Point Mechanisms in a Dualistic Process Model of Institutional Emergence: The Case of the Diesel Particulate Filter in Germany / Stéphane Guérard, Christoph Bode, Robin Gustafsson. SAGE Journal, Organization Studies – 2013. – Р. 781-822.

References:

1. Pivnyak, G.G., BusigIn, B.S., Divizinyuk, M.M., Azarenko, O.V., Korotenko, G.M. and Korotenko L.M. (2008), *Dictionary of Informatics*, National Mining University, Dnipropetrovsk, 599 p.
2. Aschepkova, N.S. and Sheptun, Yu.D. (1997), "The mathematical model of motion of the spacecraft with manipulator", *Space Science and Technology*, Vol. 3, No. 5/6, pp. 34-42.
3. Aschepkova, N.S. (2014), "Modelling and kinematic analysis of the crank mechanism", *Herald of NTU "KhPI", Informatics and Modeling*, No. 23, pp. 53-60.
4. Sokol, G.I. and Dudnikov, V.S. (2014), *Designing of flat lever mechanisms using AUTOCAD, textbook*, Poligrafiya, Dniepropetrovsk, 208 p.
5. Slepova, S.V. and Shahina, M.A. (2014), "Computer-aided design Kompas-3D (multimedia lectures)", *International Journal of Applied and Basic Research*, No. 3-2, pp. 207-208.
6. Nemnyugin, S.A. (2016), *Fortran in tasks and examples*, BKHV, St. Petersburg, 496 p.

7. Ltd. "1C: Publishing" (2010), "Application package "1C: Mathematical designer", available at: <http://obr.1c.ru/educational/uchenikam/mathkit/>.
8. Gomberg, B.N, Kondakov, S.V., Nosenko, LS. And Pavlovskaya O.O., (2012), "Simulation Modelling of a High Speed Tracked Vehicle with Electric Speed Transmission", *Bulletin of South Ural State*, Vol. 37 (296), pp. 73-81.
9. Stéphane, Guérard, Christoph, Bode and Robin, Gustafsson. (2013), "Turning Point Mechanisms in a Dualistic Process Model of Institutional Emergence: The Case of the Diesel Particulate Filter in Germany", *SAGE Journal, Organization Studies*, Vol. 34, pp. 781-822.

Поступила (received) 15.03.2016

Статью представила д-р техн. наук, проф. ДНУ имени Олеся Гончара Калинина Н.Е.

Galyna Ivanovna Sokol, Dr. Sci. Tech.

Oles Honchar Dnipropetrosk National University
Shosse Zaporozhskoye, H. 4, Dep. 287, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49107
Tel. (056) 743 34 26 E-mail : gsokol@ukr.net
ORCID orcid.org/0000-0002-6183-9155

Oleg Pavlovich Yushkewych, Cand. Sci. Tech.

Oles Honchar Dnipropetrosk National University
Str. Chernishevsky, H. 21, Dep. 13, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000
Tel. 066 775 37 58 E-mail : E. Yushkevich@i.ua

Oleksandr Lapik, Student

Oles Honchar Dnipropetrosk National University
Str. Mandrikovsrya, H. 173, Dep. 179, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49107
Tel. (056) 36 87 49 E-mail : sasha_lapik@mail.ru

Tkachuk Vladislav Sergeyevich, Student

Oles Honchar Dnipropetrosk National University
Str. Kotlyarevsky, H.11a. Dep. 44, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49000
Tel. (056) 753 95 09 E-mail : vladtkachuk5173@gmail.com
ID orcid.org/0000-0002-2071-7995

Khorischenko Oleksandr, Assistent

Oles Honchar Dnipropetrosk National University
Ave Gagarin, 72, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010
Tel. (056) 373 12 60 E-mail : vladtkachuk5173@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-5191-617X

УДК 629.7.615.3

Моделювання механізмів промислових і космічних роботів в програмному середовищі "1С. Математичний конструктор" / Сокол Г.І., Юшкевич О.П., Хоріщенко О.А., Ткачук В.С., Лапік А.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 128 – 134.

Розглянутий кінематичний аналіз механізму ходової частини робота у вигляді кривошипно-повзунного механізму з використанням пакету «1С: Математичний конструктор». Це дозволило моделювати в анімації рухи ланок механізму і наявно показати вектори швидкостей та прискорень точок ланок. Іл.: 4. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: моделювання, кінематичний аналіз, вектори швидкості та прискорення, "1С. Математичний конструктор", анімація, робот.

УДК 629.7.615.3

Моделирование механизмов промышленных и космических роботов в программной среде "1С. Математический конструктор" / Сокол Г.И., Юшкевич О.П., Хорищенко А.А., Ткачук В.С., Лапик А.И. // Весник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 128 – 134.

Рассмотрен кинематический анализ механизма ходовой части робота в виде кривошипно-ползунного механизма с использованием пакета "1С: Математический конструктор". Это позволило моделировать в анимации движения звеньев механизма и наглядно изобразить вектора скоростей и ускорений точек звеньев. Ил.: 4. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: моделирование, кинематический анализ, векторы скоростей и ускорения, "1С. Математический конструктор", анимация, робот.

УДК 629.7.615.3

Modelling of mechanisms of industrial robots and space in the software environment of "1C. Mathematical designer" / Sokol G.I., Yushkevich O.P., Khorischenko O.A., Tkachuk V.S., Lapik A.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 128 – 134.

Kinematic analysis of the mechanism chassis robot as a slider-crank mechanism with the package "1C: Mathematical designer" is showed. This has allowed simulate movement in the animation links of the mechanism and visually depict the vectors of velocities and the accelerations of links points. Figs.: 4. Refs.: 9 titles.

Keywords: modelling, kinematic analysis, vectors of velocities and the accelerations, "1C. Mathematics Designer", animation, robot.

В.С. СУЗДАЛЬ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,
Ю.М. ЕПИФАНОВ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,
И.И. ТАВРОВСКИЙ, канд. техн. наук, Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков

СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Рассмотрен синтез стабилизирующего регулятора для процесса выращивания монокристаллов, основанный на применении теории линейных матричных неравенств и мер модального доминирования. На основе адаптации собственного пространства динамических систем предложен новый подход решения задачи синтеза при одиночном изменении спектра. Ил.: 2. Табл.: 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: монокристалл, система, мера модального доминирования, задача синтеза при одиночном изменении спектра.

Постановка проблемы. Сцинтилляционные монокристаллы (МКР), для научных исследований и решения практических задач, выращивают в промышленности методом Чохральского [1]. В основе выращивания МКР из расплава этим методом, заложены принципы направленной кристаллизации, которая всегда осуществляется при наличии и взаимодействии двух направленных потоков – переноса энергии в форме тепла и межфазного массопереноса (рис. 1).

Монокристалл 2 вращается с угловой скоростью Ω и вытягивается на затравку 1 со скоростью V . Поскольку растущий кристалл не имеет контакта со стенками тигля, а форма и размер образца определяются капиллярными силами и условиями тепломассообмена в системе кристалл-расплав, то к основным параметрам процесса кристаллизации относят характерный размер (диаметр D_s) цилиндрического образца, положение фронта кристаллизации относительно свободной поверхности расплава h и уровень расплава в тигле H .

В процессе роста МКР автоматически поддерживают постоянный уровень расплава, подпитывая его исходным сырьем. Известно, что качество кристалла определяется стабильностью массовой скорости его роста, а также стабильностью формы фронта кристаллизации и равномерностью вхождения активатора по длине кристалла.

В системах управления кристаллизацией скорость роста косвенно оценивается по диаметру МКР, который и стабилизируется в процессе выращивания. Диаметром растущего кристалла управляют, стабилизируя

скорость вытягивания и тепловые условия выращивания.

Таким образом, управление выращиванием монокристаллов требует стабилизации основных параметров технологического процесса.

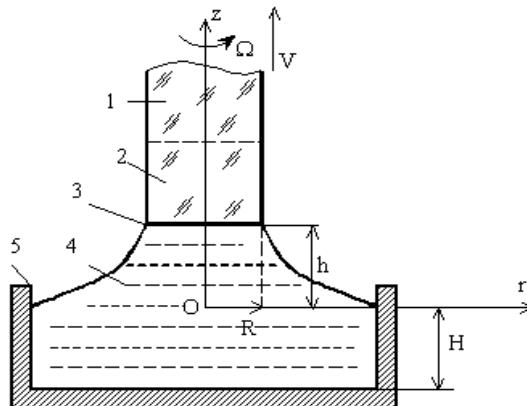


Рис. 1. Структурная схема выращивания методом Чохральского
 1 – затравка, 2 – кристалл, 3 – фронт кристаллизации, 4 – расплав, 5 – тигель,
 R – радиус кристалла, h – высота фронта кристаллизации, H – уровень расплава
 в тигле, V – скорость вытягивания кристалла, Ω – угловая скорость вращения
 кристалла, zOr – система координат.

Анализ литературы. Классический подход к синтезу стабилизирующих линейных обратных связей в пространстве состояний связан с каноническим представлением объекта управления (ОУ) и построением модального управления [2 – 5].

В задачах синтеза управления структура и порядок математической модели предполагается заданной:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \quad x(t_0) = x_0, \quad x \in R^n, \quad u \in R^s, \\ y &= Cx, \quad y \in R^m, \end{aligned} \quad (1)$$

где x – вектор состояния; A , B , C – постоянные матрицы соответствующих размеров; y – выходной вектор; u – вектор управления, подаваемого на вход объекта управления (ОУ); x_0 – начальные условия, т.е. состояние ОУ в начальный момент времени t_0 .

Модальное управление решает задачу управления спектром матрицы или размещения собственных чисел (значений), для достижения целей управления. В модальном синтезе при помощи линейных обратных связей по состоянию требуется синтезировать матрицу замкнутой системы $Q = A - BK$ с желаемым спектром, который надо уметь задавать. Построение модального управления сводится к нахождению

характеристического полинома матрицы A , выбору канонического базиса и решению системы линейных уравнений.

Разработчики, обычно определяют желаемый спектр синтезируемой системы на основе эвристических соображений. Поэтому, выбор спектра выливается в малоприятную проблему манипулирования большим количеством собственных значений, что существенно осложняет процесс исследования их влияния на поведение динамической системы, то есть основная проблема практического модального синтеза состоит в избыточном количестве параметров, влияя на которые можно получать системы с различными свойствами, в том числе и требуемыми.

Цель статьи – разработка альтернативного пути синтеза стабилизирующего управления, основанного на применении теории линейных матричных неравенств и мер модального доминирования [6 – 8].

Задача синтеза состоит в выборе закона управления из класса линейных обратных связей по состоянию вида

$$u = K_0 x, \quad (2)$$

где K_0 – матрица параметров регулятора соответствующего порядка, при котором состояние равновесия $x = 0$ замкнутой системы, является асимптотически устойчивым по Ляпунову.

Для нахождения параметров такого регулятора используют линейное матричное неравенство

$$YA^T + AY + Z^T B^T + BZ < 0, \quad Y > 0, \quad (3)$$

относительно переменных Y и Z [6]. Находя пару (Y, Z) , удовлетворяющую матричному неравенству (3), вычисляют параметры искомой обратной связи $K_0 = ZY^{-1}$.

В работах [7, 8], для синтеза модального управления предложен метод модального доминирования, сводящий выбор многих собственных значений к одному или нескольким показателям, описывающим сжатие спектра. Применение нового подхода на основе адаптации собственного пространства в динамических системах, позволит количественно контролировать тенденции изменения спектра.

Методология проведения синтеза стабилизирующего управления. В предлагаемом подходе модальный синтез предваряется синтезом асимптотически устойчивой системы с регулятором K_0 . Собственные значения λ_i этой системы определяют начальные позиции, которые изменяются в модальном синтезе путем интегрального

воздействия с оценкой доминирования, для получения требуемого спектра замкнутой системы.

Различают меры доминирования в собственном пространстве, по управляемости μ_u и наблюдаемости μ_v :

$$\mu_u = v^T B B^T v, \quad (4)$$

$$\mu_v = v^T C_k C_k^T v, \quad (5)$$

где v – левый собственный вектор матрицы A ; C_k – вектор строки по исследуемому выходу. В результате, мера доминирования по наблюдаемости подвязывается к конкретному выходу.

Матрица обратных связей $u = -Kx$ одиночного перемещения, каждого собственного значения v_i , имеет вид $K_i = B^T v_i v_i^T$, или

$$K_i = B^T v_i v_i^T \Delta / \mu_u, \quad (6)$$

где v_i – левый собственный вектор матрицы A ; Δ – величина изменения собственного значения. Отметим, что левые собственные векторы, соответствующие варьируемым собственным числам, вычисляют как транспонированные строки инвертированной матрицы нормированных собственных векторов.

Назовем элементарным изменением спектра сдвиг только одного собственного значения с сохранением прочих собственных значений и векторов матрицы A .

Модальный синтез основан на следующей теореме, доказанной в [7].

Теорема. В режимах малых перемещений собственных значений матрицу регулятора можно аппроксимировать суммой матриц регуляторов, реализующих элементарное изменение спектра, т.е.

$$K \cong K_1 + \dots + K_n,$$

где K_i определяются выражением (6).

Решение задачи модального синтеза возможно при итерационной подвижке собственных значений одного за другим, опирающейся на меру модального доминирования каждого собственного значения, в виде нормы матрицы обратных связей модального регулятора, при одиночном изменении спектра. Необходимо переносить все собственные значения на малое расстояние пропорционально их мерам модального доминирования. Очевидно, перенос мод будет успешен, если амплитуды сигналов обратных связей лежат в зоне приемлемых, исполняемых регулятором величин. Практическая реализуемость синтеза, тем самым,

зависит от характера масштабирования переменных состояния и управления, отражающегося, в том числе, на нормах столбцов матрицы B , входящей в определение меры.

Для коллективной подвижки λ_i введен коэффициент сжатия спектра s . Причем, $\Delta = s\mu$, то есть, чем меньше коэффициент сжатия спектра s , тем точнее будет выполнен совместный перенос. Этим коэффициентом можно варьировать в процессе итераций, добиваясь необходимого вида переходного процесса и учитывая ограничения на норму матрицы коэффициентов обратных связей, что дает косвенную гарантию хорошего синтеза.

Практические результаты синтеза управления. Данные для идентификации ОУ, получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристаллов CsI(Tl) диаметром (300 – 500) мм. Процесс выращивания рассматривался как LTI-объект с входной величиной – температура основного нагревателя T_d и выходом – диаметр кристалла D_s . В пространстве состояний ОУ имеет, следующие матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -2,5590 & 0,3961 & 0,0373 \\ 0 & -0,2327 & -0,1578 \\ 0 & 0 & -0,1464 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1,2164 \\ -0,5342 \\ -0,1798 \end{bmatrix},$$

$$C = [1,0217 \quad 1,2614 \quad 1,1183], \quad D = 0.$$

На первом этапе синтезирован регулятор на основе решения матричного неравенства (3) в среде Matlab. Использовалась команда оптимизации $[tmin, xfeas] = feasp(lmusys, options, target)$, в которой $tmin$ и $xfeas$, дают значение параметра, который минимизируется, и отвечающего ему решения матричного неравенства. Аргументы команды $feasp$: $lmusys$ – описание линейного матричного неравенства; $options$ – описание параметров алгоритма оптимизации; $target$ – назначаемое значение параметра $tmin$. Параметры синтезированного регулятора: $K_0 = [1,80 \quad -0,32 \quad -0,06]$.

В табл. 1 приведен спектр – собственные значения λ_i и соответствующие им меры модального доминирования по управляемости замкнутой системы с регулятором K_0 . Собственные числа размещены в порядке убывания мер их модальной управляемости.

На старте итерационного процесса синтеза модального регулятора коэффициент сжатия спектра $s = 0,001$. Варьируя в процессе итераций этим коэффициентом, добиваются необходимого вида переходного

процесса и учитывают ограничения на норму матрицы коэффициентов обратных связей.

Таблица 1

Собственные значения и меры модального доминирования

λ_i	- 4,93	- 0,24	- 0,15
Мера управляемости μ_u	1,68	0,18	0,033

Синтез дал, следующие результаты: количество итераций 800; матрица регулятора $K = [2,25 \ - 0,56 \ - 0,53]$; максимальное значение нормы матрицы $\|K\| = 2,3772$; матрица замкнутой системы

$$Q = \begin{bmatrix} -5,30 & 1,08 & 0,68 \\ 1,20 & -0,53 & -0,44 \\ 0,40 & -0,10 & -0,24 \end{bmatrix}.$$

Собственные значения и соответствующие им меры модального доминирования модальной замкнутой системы управления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Собственные значения и меры модального доминирования замкнутой системы управления

Собственные значения	-5,61	-0,30	-0,15
Мера модального доминирования	1,73	0,11	0,01

На рис. 2 приведена кривая переходного процесса в замкнутой системе.

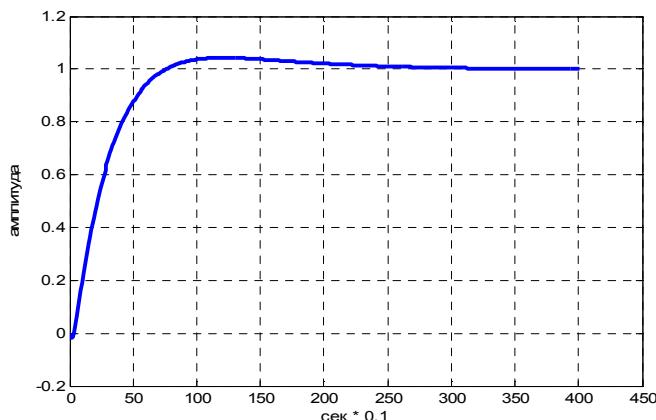


Рис. 2. Переходной процесс в модальной замкнутой системе

Длительность переходного процесса (не превышает 10 с), и малое перерегулирование, удовлетворяют требованиям к качеству управления при выращивании МКР диаметром до 500 мм.

Замкнутая система с синтезированным регулятором имеет в канале управления диаметром быстрое доминирующее собственное значение $\lambda_1 = -5,61$ с мерой $\mu_{u1} = 1,73$ (табл. 2), что позволяет реагировать на кратковременные возмущения тепловых условий и уменьшить их влияние на распределение активатора по длине кристалла.

Выводы. В результате проделанной работы, проведен двухэтапный синтез стабилизирующего регулятора для управления диаметром при выращивании сцинтилляционного монокристалла. Подтверждена основная идея о том, что адаптация собственного пространства у динамических систем оправдана: ни спектр, ни собственные векторы не стоит менять огульно, без особой на то нужды. Не огульно, это значит привлечение классических методов синтеза стабилизирующего управления на первой стадии, определяющее начальные позиции для модального синтеза, и использование мер модального доминирования на втором этапе синтеза. Задача решена при итерационной подвижке собственных значений одного за другим, с оценкой меры модального доминирования каждого из них и нормы матрицы обратных связей модального регулятора, при одиночном изменении спектра. Достигнуты требуемые параметры качества замкнутой системы.

Список литературы: 1. Горилецкий В.И. Рост кристаллов / В.И. Горилецкий, Б.В. Гринев, Б.Г. Заславский и др. // – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с. 2. Леонов Г.А. Методы стабилизации линейных управляемых систем / Г.А. Леонов, М.М. Шумафов. – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2005. – 421 с. 3. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых знаний. – 2002. – 832 с. 4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – МЭИ, 2004.– 350 с. 5. Арунянц Г.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами / Г.Г. Арунянц, З.Г. Салихов, А.Л. Рутковский. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 496 с. 6. Баландин Д.В. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств / Д.В. Баландин, М.М. Коган. – М.: Физматлит, 2007. – 280 с. 7. Балонин Н.А. Новый курс теории управления движением / Н.А. Балонин. – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2000. – 160 с. 8. Балонин Н.А. Модальное управление в системах кристаллизации / Н.А. Балонин, В.С. Сузаль, Ю.С. Козьмин // Международный научно-технический журнал "Проблемы управления и информатики". – К. – 2014. – № 4. – С. 96–101.

References:

1. Goriletskij, V.I., Grinev, B.V., Zaslavskij, B.G. at all. (2002), *Crystal Growth*, Scientific Publishing "AKTA", Kharkov, 535 p.
2. Leonov, G.A. and Shumafov, M.M. (2005), *Methods of stabilization linear controlled systems*, Publishing House of St. Petersburg Un-ty, St. Petersburg, 421 p.
3. Dorf, R. and Bishop, R. (2002), *Modern control systems*, "Laboratory of Basic Knowledge", Moscow, 832 p.

4. Rotach, V.Ya., (2004), *Automatic Control Theory*, MPEI, Moscow, 350 p.
5. Arunijants, G.G., Salikhov, Z.G. and Rutkovskij, A.L., (2004), *Optimal control systems of complex technological objects*, Heat and Power Engineering, Moscow, 496 p.
6. Balandin, D.V. and Kogan, M.M. (2007), *Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities*, FIZMATLIT, Moscow, 280 p.
7. Balonin, N.A. (2000), *New Deal Movement Control Theory*, Publishing House of St. Petersburg Un-ty, St. Petersburg, 160 p.
8. Balonin, N.A., Suzlal, V.S. and Kozmin, Yu.S. (2014), "Modal control in crystallization systems", *Problems of control and informatics Journal*, No. 4, pp. 96-101.

Поступила (received) 14.04.2016

*Статью представил д-р физ.-мат. наук, зав. отделом 2319 ИСМА
НАН Украины Тарасов В.А.*

Suzdal Viktor, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher
ISMA NAS of Ukraine
Ave. Nauki, 60, Kharkov, Ukraine, 61001
Tel. (057) 341-01-45, email: suzdal@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0002-3816-9886

Yepifanov Yuriy, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher
ISMA NAS of Ukraine
Ave. Nauki, 60, Kharkov, Ukraine, 61001
Tel. (057) 341-04-27, email: epiphanov@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-2303-9138

Tavrovskiy Ihor, Cand. Sci. Tech.
ISMA NAS of Ukraine
Ave. Nauki, 60, Kharkov, Ukraine, 61001
Tel. (057) 341-01-45, email: tawr@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0001-9175-1667

УДК 621.3.078.3

Синтез стабілізуючого керування процесами вирощування монокристалів / Суздаль В.С., Єпіфанов Ю.М., Тавровський І.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – № 21 (1193). – С. 135 – 143.

Розглянуто синтез стабілізуючого регулятора для процесу вирощування монокристалів, заснований на застосуванні теорії лінійних матричних нерівностей та мір модального домінування. На основі адаптації власного простору динамічних систем запропоновані новий підхід рішення задачі синтезу при одиночному зміненні спектра. Іл.: 2. Табл.: 2. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: монокристал, система, міра модального домінування, задача синтезу при одиночному зміненні спектра.

УДК 621.3.078.3

Синтез стабилизирующего управления процессами выращивания монокристаллов / Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Тавровский И.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 135 – 143.

Рассмотрен синтез стабилизирующего регулятора для процесса выращивания монокристаллов, основанный на применении теории линейных матричных неравенств и мер модального доминирования. На основе адаптации собственного пространства динамических систем предложен новый подход решения задачи синтеза при одиночном изменении спектра. Ил.: 2. Табл.: 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: монокристалл, система, мера модального доминирования, задача синтеза при одиночном изменении спектра.

UDC 621.3.078.3

Synthesis of Stabilizing control of processes growing single crystals / Suzdal V.S., Yepifanov Y.M., Tavrovskiy I.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 135 – 143.

The synthesis of stabilizing controller for the growing single crystals process, based on the application of the theory of linear matrix inequalities and measures of the modal dominance are considered. On the basis of the adaptation of its own space of dynamical systems, are proposed a new approach to solving the problem of synthesis for a single spectrum change. Figs.: 2. Tabl.: 2. Refs.: 8 titles.

Keywords: single crystal, system, measure of the modal dominance, problem of synthesis for a single spectrum change.

B.I. СУХОРУКОВ, д-р мед. наук, зав. від., ДУ "Інститут неврології, психіатрії та наркології НАМН України", Харків,

I.A. СЕРБІНЕНКО, канд. мед. наук, п.н.с., ДУ "Інститут неврології, психіатрії та наркології НАМН України", Харків,

Ю.В. БОВТ, канд. мед. наук, п.н.с., ДУ "Інститут неврології, психіатрії та наркології НАМН України", Харків,

Л.П. ЗАБРОДІНА, канд. біол. наук, с.н.с., ДУ "Інститут неврології, психіатрії та наркології НАМН України", Харків

КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ ЗМІН СТРУКТУРИ НІЧНОГО СНУ ХВОРИХ НА ЕНЦЕФАЛОПАТИЮ ПІД ВПЛИВОМ ГЕОМАГНІТНИХ БУР

За допомогою комп'ютерного комплексу "Нейрон-Спектр+" проведено об'єктивне дослідження нічного сну (полісомнографія) у хворих на енцефалопатії. З'ясовано, що в період зростання напруженості геомагнітного поля реєструються зміни структури нічного сну, які відображають виражену зміну балансу функціонування сомногенної системи механізмів та активуючої системи з превалюванням механізмів активації, що нарощає за ступенем вираженості залежно від стадії енцефалопатії. Табл.: 2. Бібліogr.: 18 назв.

Ключові слова: структура нічного сну, полісомнографія, геомагнітні бури, енцефалопатія.

Постановка проблеми. Серцево-судинні та зокрема цереброваскулярні захворювання посідають одне з перших місць за розповсюдженістю, смертністю і частотою інвалідізації в Україні та світі [1 – 5]. Хронічна судинно-мозкова недостатність реєструється у 20 – 30% осіб працездатного віку. За спостереженнями більшості дослідників [2, 3, 5] найбільш частими причинами порушення кровопостачання головного мозку є гіпертонічна хвороба, атеросклероз магістральних артерій голови або шії. Серед факторів ризику декомпенсації гіпертонічної та атеросклеротичної енцефалопатії значне місце належить змінам геомагнітного стану в період магнітних бур, коли кількість інфарктів міокарда зростає в 2,5 рази, а гострих порушень мозкового кровообігу у 2 рази [5, 6]. Тому актуальність визначення нейрофізіологічних механізмів декомпенсації хворих на енцефалопатії судинного генезу під впливом геомагнітних збурювань не викликає сумніву.

Аналіз літератури. На сьогодні сформувалися різні підходи до пошуку механізмів впливу сонячної активності на живі організми:

магнітна гіпотеза, метеорологічний підхід, геофізичний механізм впливу, теорія коливань. Є багато гіпотез по інтерпретації механізмів магнітобіологічних ефектів: гіпотеза Дж. Піккарді, теорія магнітного параметричного резонансу у біосистемах та ін. Однією з останніх є теорія адаптаційного стресу [7]. Припускається, що геомагнітні бури є стресорним фактором для організму людини, однак, на думку дослідників, не можна виключити й інші механізми [7 – 9]. Встановлено, що особливо чутливими до впливу магнітних бур є серцево-судинна та нервова системи [7 – 10]. В період бур виявлялись різні функціональні розлади: порушення серцевого ритму, підвищення артеріального тиску, зменшення варіабельності серцевих скорочень, змінення реологічних характеристик крові та капілярного кровотоку, посилення агрегації еритроцитів та інші [7, 9, 11]. Відомо, що як у практично здорових, так і у хворих, чутливим до впливу багатьох факторів є сон [12 – 18]. Порушення циклу сон – неспання спостерігається при магнітних бурах особливо у хворих на серцево-судинні захворювання. Однак, до теперішнього часу не визначені особливості нейрофізіологічних механізмів порушень нічного сну при змінах геомагнітних впливів у практично здорових та хворих на судинні енцефалопатії.

Мета роботи. Виявлення змін структури нічного сну у хворих на енцефалопатії гіпертонічного та атеросклеротичного генезу під впливом геомагнітних бур.

Полісомнографія. Об'єктивне дослідження нічного сну (полісомнографія) у хворих на енцефалопатії атеросклеротичного та гіпертонічного генезу проводилось за допомогою комп'ютерного комплексу "Нейрон-Спектр+" з одночасною безперервною реєстрацією електроенцефалограмами (ЕЕГ), електроокулограмами (ЕОГ), електроміограмами (ЕМГ) та електрокардіограмами (ЕКГ). Було використано чотири монополярних канали ЕЕГ: два центральних і два потиличних відведення із правої та лівої півкуль головного мозку; 2 канали ЕОГ з лівого та правого ока; один канал ЕМГ з області підборіддя та один канал ЕКГ з нижньої частини грудної клітини по серединно-ключичній лінії. Оцінка стадій і фаз сну здійснювалась за Міжнародною класифікацією стадій і фаз сну. Оцінювались наступні стандартні параметри сну: тривалість сну; час засинання; тривалість і відсоток неспання в період сну; кількість пробуджень; індекс ефективності сну; кількість циклів сну; латентні періоди стадій і фаз сну; тривалість С1, С2, С3, С4 стадій фази повільнохвильового сну (ФПС), фази швидкого сну (ФШС), а також їх представленість у відсотках; кількість сегментів, їх середня тривалість в стадіях і фазах сну.

Рівень збуреності геомагнітного поля оцінювався за допомогою

інтегрального показника – планетарного Кр-індексу. Проведено співставлення даних полісомнографії на тлі помірної геомагнітної ситуації (ПГМС) – тригодинний Кр-індекс від 0 до 3 балів, добовий не перевищував 20 балів та на тлі активної геомагнітної ситуації (АГМС) – тригодинний Кр-індекс до 5 балів, добовий від 20 до 30 балів. Достовірність відмінностей між групами спостереження розраховувалась за допомогою непараметричного критерію Манна-Уїтні.

Результати дослідження. Встановлено, що у хворих на енцефалопатії 1 стадії навіть при відсутності скарг і клінічних проявів порушень сну в період зростання напруженості геомагнітного поля реєструються зміни структури нічного сну, а саме скорочення глибокого повільнохвильового сну, особливо стадії С4, збільшення числа коротких пробуджень, що не фіксуються в пам'яті хворого (в табл. 1).

Таблиця 1
Показники нічного сну у хворих на енцефалопатії 1 стадії при різних геомагнітних ситуаціях

Показник нічного сну	Напруженість геомагнітного поля	
	ПГМС	АГМС
Час засинання, хв.	10,5±1,3	24,5±2,3*
Тривалість сну, хв.	318,3±31,7	280,1±22,7
Тривалість стадії С1, хв.	19,5±6,8	36,5±11,4
Тривалість стадії С2, хв.	123,5±15,8	117,5±12,9
Тривалість стадії С3, хв.	42,0±9,4	34,7±15,7
Тривалість стадії С4, хв.	67,2±5,9	37,5±3,1*
Тривалість дельта-сну, хв.	109,2±9,1	72,2±5,3*
Тривалість ФПС, хв.	252,0±20,1	226,2±25,1
Тривалість ФШС, хв.	66,1±8,3	53,9±7,4
Тривалість пильнування, хв.	34,5±11,8	62,5±10,7
Кількість пробуджень.	25,4±2,3	39,8±3,2*
Кількість пробуджень, що більше 3 хв.	3,1±0,9	10,4±2,1*
Індекс ефективності сну, %	89,6±8,1	64,9±4,9*
Число завершених циклів сну	3,7±1,9	2,9±1,5

Примітка: * – $p \leq 0,05$, достовірність відмінностей за критерієм Манна-Уїтні.

Скарги хворих на погіршення сну корелюють вже з більше вираженими порушеннями структури нічного сну (збільшення часу засинання, часті тривалі пробудження, за рахунок яких реєструється зменшення індексу ефективності сну).

У хворих на енцефалопатії 2 стадії навіть при відсутності яких-

небудь скарг під час зміни напруженості геомагнітного поля реєструються порушення структури нічного сну, а саме значне скорочення дельта-сну, скорочення фази бістрого сну, часті тривалі нічні пробудження, що призводять до зменшення індексу ефективності сну (в табл. 2).

Таблиця 2
Показники нічного сну у хворих на енцефалопатії 2 стадії при різних геомагнітних ситуаціях

Показник нічного сну	Напруженість геомагнітного поля	
	ПГМС	АГМС
Час засинання, хв.	18,5±3,5	11,5±4,7
Тривалість сну, хв.	320,4±29,1	146,1±11,2*
Тривалість стадії С1, хв.	52,1±7,9	86,1±21,4
Тривалість стадії С2, хв.	148,2±25,8	86,5±27,1
Тривалість стадії С3, хв.	28,9±3,4	14,2±2,1*
Тривалість стадії С4, хв.	37,1±4,1	19,3±2,2*
Тривалість дельта-сну, хв.	66,0±3,3	43,5±2,7*
Тривалість ФПС, хв.	266,3±11,3	120,1±9,1*
Тривалість ФШС, хв.	54,1±5,1	33,5±3,2*
Тривалість пильнування, хв.	72,7±36,2	234,0±33,7
Кількість пробуджень	30,3±3,1	58,3±2,1*
Кількість пробуджень, що більше 3 хв.	4,2±1,1	29,1±3,1**
Індекс ефективності сну, %	76,5±2,3	51,3±1,4**
Число завершених циклів сну	2,4±0,7	1,5±0,2

Примітка: * – $p \leq 0,05$, ** – $p \leq 0,01$, достовірність відмінностей за критерієм Манна-Уїтні.

За 1 – 2 доби до магнітної бурі виразність порушень структури нічного сну ще більше зростала й зберігалась протягом 2 діб після магнітної бури. При 3 стадії енцефалопатії спостерігалося порушення циркадних ритмів із подрібненими епізодами сну протягом доби й реєстрацією виражених перебудов функціонування сомногенних механізмів мозку.

Висновки. За допомогою комп’ютерного комплексу проведено комплексний аналіз змін структури нічного сну у хворих на енцефалопатії гіпертонічного та атеросклеротичного генезу при зміні геомагнітних впливів. Результати комплексного аналізу дозволили обґрунтовано вважати, що в період геомагнітних бур відбувається виражена зміна балансу функціонування сомногенної системи механізмів та активуючої системи головного мозку з превалюванням механізмів

активації, які нарощають за ступенем вираженості залежно від стадії енцефалопатії та від стану адаптаційно-компенсаторних механізмів.

- Список літератури:** 1. Зозуля І.С. Інсульт: стратегія і тактика надання медичної допомоги / І.С. Зозуля, В.І. Цимбалюк, А.І. Зозуля // Український медичний часопис. – 2012. – № 5 (91). – С. 36. 2. Корнацький В.М. Соціальні та медичні проблеми цереброваскулярної патології / В.М. Корнацький, І.Л.Ревенько // Укр. кардіол. журнал. – 2008. – № 2. – С. 12-18. 3. Князевич В.М. Основні особливості та тенденції розповсюдженості хвороб системи кровообігу та ревматичних захворювань в Україні за 1998-2007 рр. / В.М. Князевич // Центр медичної статистики МОЗ України. – К.: 2008. – С. 6-10. 4. Жигунова А.В. Остановим інсульт вместе / А.В. Жигунова // Український медичний часопис. – 2012. – № 5 (91). – С. 6. 5. Возіанов О.Ф. Смертність населення України: головні причини, шляхи, подолання негативних тенденцій / О.Ф. Возіанов // Журнал академії медичних наук України. – 1996. – Т. 2. – № 2. – С. 191-197. 6. Результаты многоцентровых статистических исследований влияния геомагнитных возмущений на острую сердечно-сосудистую и церебральную патологию / Гурфинкель Ю.И., Митрофанова Т.А., Кукуй Л.М. и др. // Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей – М.: Адамантъ, 2006. – С. 185-196. 7. Бреус Т.К. Космическая и земная погода и их влияние на здоровье и самочувствие людей / Т.К. Бреус // Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии. Физические подходы и клиническая практика. – М.: Книжный дом, 2010. – Вып. 2. – С. 141. 8. Черноус С.А. Вариабельность сердечного ритма при геомагнитных возмущениях и летних загрузках на Севере / С.А. Черноус, Н.К. Белишева, В.Ф. Григорьев // Космическая погода: ее влияние на биологические объекты и человека – М.: Перспо ЦЕНТР, 2006. – С. 71. 9. Зенченко Т.А. Характерные типы реакций на действие земной и космической погоды у здоровых людей и больных с артериальной гипертензией / Т.А. Зенченко, А.М. Мерзлый, Т.К. Бреус // Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии. Физические подходы и клиническая практика – М.: Книжный дом, 2010. – Вып. 2. – С. 141-155. 10. Тріщинська М.А. Оптимізація лікувальної тактики у пацієнтів з інсомнією на тлі початкових проявів недостатності мозкового кровообігу / М.А. Тріщинська // Міжнародний неврологічний журнал. – 2014. – № 6 (68). – С. 29-36. 11. Кириллова И.А. Изменение циркадной структуры регуляции сердечного ритма под влиянием хронического недостатка сна / И.А. Кириллова, И.М. Воронин, О.Н. Жалнина // Сон – окно в мир бодрствования: тезисы докладов. 4-ая Российской школа-конференция, РАН. – Москва. – 2007. – С. 42-43. 12. Полуэктов М.Г. XX конференция Американской ассоциации специалистов в области медицины сна / М.Г. Полуэктов, О.С. Левин // Неврологический журнал. – 2007. – Т. 12. – № 1. – С. 63. 13. Екимова И.В. Вклад возбуждающих и тормозных нейромедиаторных систем медиальной преоптической области гипоталамуса в регуляции цикла бодрствование – сон / И.В. Екимова, Т.Г. Комарова, Ю.Ф. Пастухов // Актуальные проблемы сомнологии: тезисы докл. IV Всерос. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 26-28 ноября, 2008 г. – СПб.: 2008. – С. 27. 14. Ватаев С.И. ЭЭГ-проявления в цикле бодрствование – сон, имеющие связь с пароксизмальными состояниями у крыс / С.И. Ватаев // Актуальные проблемы сомнологии: тезисы докл. IV Всерос. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 26-28 ноября, 2008 г. – СПб.: 2008. – С. 27. 15. Thorpy M.J. Classification of sleep disorders / M.J. Thorpy, M.H. Kryger, T. Roth, W.C. Dement // Principles and practice of sleep medicine. – 2005. – Part II. – P. 615-625. 16. Black J. Recent advances in the treatment and management of excessive daytime sleepiness / J. Black, S.P. Duntley, R.K. Bogan, M.B. O'Malley // CNS Spectr. – 2007. – V. 12. – Suppl. 2. – P. 1-14. 17. Rains J.C. Sleep and headache disorders: clinical recommendations for headache management / J.C. Rains, J.S. Poceta // Headache. – 2006. – V. 46. – Suppl. 3. – P. 147-148. 18. Munch M. Is homeostatic sleep regulation under

low sleep pressure modified by age? / M. Munch, V. Knoblauch, K. Blatter, A. Wirz-Justice // Sleep. – 2007. – V. 30. – №. 6. – P. 781-792.

References:

1. Zozulya, I.S., Tsymbalyuk, V.I. and Zozulya, A.I (2012), "Stroke: strategy and tactics of Medicaid", *Ukrainian medical magazine*, No. 5 (91), pp. 36.
2. Kornatskiy, V.M. and Revenko, I.L. (2008), "Social and medical problems of cerebrovascular pathology", *Ukr. cardiol. Journal*, No. 2, pp. 12-18.
3. Knyazevich, V.M. (2008), "The main features and trends in the prevalence of cardiovascular diseases and rheumatic diseases in Ukraine for 1998-2007 years", *Center of medical statistics of Ministry of Health of Ukraine*, pp. 6-10.
4. Zhygunova, A.V. (2012), "Stop stroke together", *Ukrainian medical magazine*, No. 5 (91), pp. 6.
5. Vozianov, O.F. (1996), "Mortality in Ukraine: main reasons, ways to overcome negative tendencies", *Journal of Academy of Medical Sciences of Ukraine*, Vol. 2, No. 2, pp. 191-197.
6. Gurfinkel, Yu.I., Mitrofanova, T.A., Kukuy, L.M. and etc. (2006), *Results of multicentral statistical research of influence of geomagnetic disturbance on acute cardiovascular and cerebral pathology*, Adamant, Moskow, pp. 185-196.
7. Breus, T.K. (2010), *Space and Earth's weather and its impact on health and well-being of people, Methods of nonlinear analysis in cardiology and oncology. Physical approaches and clinical practice*, Khizhniy dom, Moskow, 141 p.
8. Chernous, S.A., Belisheva, N.K. and Grigor'ev, V.F. (2006), *Heart rate variability during geomagnetic disturbances and flight loads in the North Space weather: its influence on biological objects and human*, Rerpo CENTER, Moskow, 71 p.
9. Zenchenko, T.A., Merzliy, A.M. and Breus T.K. (2010), *Specific types of reactions to the action of terrestrial and space weather in healthy people and patients with hypertension. Methods of nonlinear analysis in cardiology and oncology. Physical approaches and clinical practice*, Khizhniy dom, Moskow, pp. 141-155.
10. Trishinska, M.A. (2014), "Optimizing treatment tactic in patients with insomnia on a background of the initial manifestations of cerebrovascular insufficiency", *International Neurology Journal*, No. 6 (68), pp. 29-36.
11. Kirilova, I.A., Voronin, I.M. and Zhelnina, O.N. (2007), "Changing of heart rate circadian structure regulation under the influence of a chronic lack of sleep", *Sleep is a window into the waking world: proc. of 4th Russian conference school*, RAS., Moskow, pp. 42-43.
12. Poluektov, M.G. and Levin, O.S. (2007), "XX conference of American association of sleep medicine", *Neurology Journal*, Vol. 12, No. 1, p. 63.
13. Yekimova, I.V., Komarova, T.G. and Pastukhov, Yu.F. (2006), "The contribution of excitatory and inhibitory neurotransmitter systems of the medial preoptic area of the hypothalamus in the regulation of cycle wakefulness – sleep", *Actual problems of somnology: proc. of 5th Russian conf.* 2006, Moscow, p. 33.
14. Vataev, S.I. (2008), "EEG manifestations in the wake-sleep cycle, having a relationship with paroxysmal states in rats", *Actual problems of somnology: proc. of IV Russian conf. with international participation 2008*, St. Petersburg, p. 27.
15. Thorpy, M.J., Kryger, M.H., Roth, T. and Dement, W.C. (2005), "Classification of sleep disorders", *Principles and practice of sleep medicine*, Part II, pp. 615-625.
16. Black, J., Duntley, S.P., Bogan, R.K. and O'Malley, M.B. (2007), "Recent advances in the treatment and management of excessive daytime sleepiness", *CNS Spectr.* Vol. 12, pp. 1-14.

17. Rains, J.C. and Poceta, J.S. (2006), "Sleep and headache disorders: clinical recommendations for headache management", *Headache*, Vol. 46, pp. 147-148.
18. Munch, M., Knoblauch, V., Blatter, K. and Wirz-Justice, A. (2007), "Is homeostatic sleep regulation under low sleep pressure modified by age?", *Sleep*, Vol. 30, No. 6, pp. 781-792.

Надійшла (received) 30.03.2016 р.

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. каф. ОТП НТУ "ХПІ"
Поворознюк А.І.*

Sukhorukov, Viktor, Dr. Med. Sci. Professor
State Institution "Institute of Neurology, Psychiatry and Addiction NAMS of Ukraine"
Str. Academica Pavlova, 46, Kharkov, Ukraine, 61068
Tel (057) 738-41-46, e-mail: inpn_sukhorukov@mail.ru

Serbinenko, Irina, Cand. Med. Sci.
State Institution "Institute of Neurology, Psychiatry and Addiction NAMS of Ukraine"
Str. Academica Pavlova, 46, Kharkov, Ukraine, 61068
Tel (057) 738-41-46, e-mail: inpn_sukhorukov@mail.ru

Bovt, Yuliya, Cand. Med. Sci.
State Institution "Institute of Neurology, Psychiatry and Addiction NAMS of Ukraine"
Str. Academica Pavlova, 46, Kharkov, Ukraine, 61068
Tel (057) 738-41-46, e-mail: inpn_sukhorukov@mail.ru

Zabrodina, Ludmila, Cand. Biol. Sci.
State Institution "Institute of Neurology, Psychiatry and Addiction NAMS of Ukraine"
Str. Academica Pavlova, 46, Kharkov, Ukraine, 61068
Tel (057) 738-41-46, e-mail: inpn_sukhorukov@mail.ru

УДК 616.831-008.64-02:613.168:612.014.426

Комп'ютерний аналіз змін структури нічного сну хворих на енцефалопатії під впливом геомагнітних бур / Сухоруков В.І., Сербіненко І.А., Бовт Ю.В., Забродіна Л.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 144 – 151.

За допомогою комп'ютерного комплексу "Нейрон-Спектр+" проведено об'єктивне дослідження нічного сну (полісомнографія) у хворих на енцефалопатії. З'ясовано, що в період зростання напруженості геомагнітного поля реєструються зміни структури нічного сну, які відображають виражену зміну балансу функціонування сомногенної системи механізмів та активуючої системи з превалюванням механізмів активації, що нарastaє за ступенем вираженості залежно від стадії енцефалопатії. Табл.: 2. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: структура нічного сну, полісомнографія, геомагнітні бури, енцефалопатія.

УДК 616.831-008.64-02:613.168:612.014.426

Компьютерный анализ изменений структуры ночного сна у больных энцефалопатией под влиянием геомагнитных бурь / Сухоруков В.И., Сербиненко И.А., Бовт Ю.В., Забродина Л.П. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 144 – 151.

С помощью компьютерного комплекса "Нейрон-Спектр+" проведено объективное исследование ночного сна (полисомнография) у больных энцефалопатией. Показано, что в период повышения напряженности геомагнитного поля регистрируются изменения структуры ночного сна, которые отражают выраженное изменение баланса функционирования сомногенной системы механизмов и активирующей системы с превалированием механизмов активации, что нарастают по степени выраженности в зависимости от стадии энцефалопатии. Табл.: 2. Библиогр. 18 назв.

Ключевые слова: структура ночного сна, полисомнография, геомагнитные бури, энцефалопатия.

UDC 616.831-008.64-02:613.168:612.014.426

Computer analysis of changes in structure of night sleep of patients with encephalopathy under the influence of geomagnetic storms / Sukhorukov V.I., Serbinenko I.A., Bovt Yu.V., Zabrodina L.P. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 144 – 151.

By means of a computer complex "Neuron-Spectrum +" an objective overnight sleep study (polysomnography) in patients with encephalopathy was conducted. It is shown that in the period of increased intensity of the geomagnetic field changes in structure of night sleep are registered. These changes reflect a pronounced shift in balance of functioning mechanisms of somnogenic and activating systems with predominance of the activation mechanisms, which are growing in severity depending on the stage of encephalopathy. Tabl.: 2. Refs.: 18 titles.

Keywords: structure of night sleep, polysomnography, geomagnetic storm, encephalopathy.

V.I. TIKHONOV, dr. of techn. sciences, professor, "ONAT", Odessa,

A. TAHER, PhD student, "ONAT", Odessa,

O.V. TYKHONOVA, teacher, "ONAT", Odessa

CONVEYOR MODULE RESOURCE SCHEDULING IN PACKET BASED COMMUNICATION CHANNEL

The paper focuses researches on channel resource reservation and scheduling in packet based networks. An axiomatic basis for enhanced packet based internetworking design formulated. A cross-layer method originated to leverage integrated heterogeneous data flow in converged digital channel based on cyclic conveyor module resource scheduling. Figs.: 2. Refs.: 22 titles.

Keywords: packet based network, conveyor module resource scheduling, cyclic conveyor module.

The problem statement. Migration towards next generation networks faces challenges of QoS policing for real time applications and machine-to-machine interaction. The legacy per-flow based QoS provision for IntServ model was standardized in resource reservation protocol (RSVP) which proved overly complicated, purely scalable and therefore, not widely used. An RSVP successor was presented in 2010 as next step in signaling (NSIS) protocol suite to provide extended functionality for both IntServ and DiffServ routers. Another modern trend in telecoms is software-defined networking (SDN) intended to consolidate the control plane of network resource management; it has been experienced in some plain architecture applications, e.g. big data centers. This approach encounters management complexity, feedback time delays and system robustness issues. Eventually, neither IP-based resource reservation methods nor SDN decisions demonstrate promising achievements in reliable wide area end-to-end packet based voice communication over the Internet.

Last years, the "All over IP" service delivery has been developed in 4G mobile networks based on voice over LTE (VoLTE); yet, it is not fully equivalent to VoIP technique as it solely supports virtual end-to-end voice connections in an autonomous administration system (AS) for dedicated transporting infrastructure. One of the first claims for VoLTE mobile network integration was announced in 2015 by two leading American operators Verizon and AT&T; but it turned to be difficult task, and therefore, not accomplished yet.

Consider the telecom/Internet service integration during last few decades we state that circuit-to-packet network convergence remains an actual problem. In particular, enhanced uniformed algorithms of multimedia data

scheduling in packet based digital channel are to be investigated.

Related publication analysis. The multimedia QoS aware data management is one of the principal issues of NGN concept for network convergence and service integration. An exhaustive survey on telecommunication service evolution given in [1]. The circuit-switched communications designed in 80-th years of 19-th century, and packet-switched computer networks emerged 100 years later on, have been traditionally occupying different niches within corporations. Because of poor voice-over-IP quality and call latency, hybrid systems expected in the near future [2]. As noted in [3], the overall network and media convergence will be the buzzword for the first decades of this century.

The use of multiple communication modes in a single network offers convenience and flexibility but faces new problems; among those, the sheer demand for bandwidth is perhaps the most significant [4]. Another key issue is the need for standards that ensure seamless operation with multiple end-user platforms; this is not only a technical problem, but also involves relationship among multiple entities [5]. The specialist of the Allstream Inc. outline five networking stages evolution to next generation IP managed network [6]; despite an amount of work underway, there is a still not complete agreement on a specific definition of “NGNs” [7]. Herewith, next generation core networks migrate to managed IP networks apart from PSTN and common Internet with respect to wholesale payment, peering policy, routing methods and interworking protocols. They say in [7] that packets do not require end-to-end dedicated path while interworking between the NGN and existing networks provided through media gateways. This poses significant research challenges in timely service delivery, efficient spectrum utilization, protocol stack unification, vertical protocol integration mechanisms in heterogeneous networks and QoS negotiation during inter-system handoff and diverse network interconnection [7].

Experts in [8] indicate that telecom network interoperability (NI) is one of most critical issues in communications to solve in the 21-st century because it is the main enabler for service convergence. Actually, there is no unique definition of the “interoperability” term, which depends on vendor implementation and abstraction levels. The IEEE formulates the NI function in terms of customer view [9]. Quoting the [8], the system view on the interoperability foremost involves specification of protocol suites along with the end-to-end connection and QoS control. Service providers, such as Verizon and AT&T in the recent past, have been obliged to operate distinct networks for IP and transport [10]. As IP transport systems lack dynamic interaction, IP networks underuse transport potentials being far from benefits of dynamic circuit switching (more scalability, higher data rates and lower

power consume); in fact, statistical multiplexing is less critical in core transport with high aggregated and relatively smooth data flows [10].

To compromise packet and circuit switching techniques across an autonomously software driven network (SDN), an open flow protocol and related unified architecture have been originated in [10]. This framework implies that all the underlying switching hardware (packet and circuit switches) will be driven by an external control plane including network operating system with on top applications and open flow protocol to manage data flow tables of switches.

A comprehensive study of modern data transmission methods given in [11]. In particular, bandwidth allocation and resource scheduling issues considered, such as time division switching fabric based on a slotted random access bus. The aforesaid method corresponds to the hybrid packet/time slotted circuit switched scheme (HPTS) presented in [12] where real time data segments follow a circuit path with no packet loss or jitter; instead, the other ones are following packet switched path being statistically multiplexed.

The problems of telecom and Internet technologies convergence in the context of multimedia data management reflected in [1, 13]. The issues of machine type communication (MTC) standardization highlighted along with open network virtualization aspects. The MTC systems give rise to new demands of communication scalability due to the rapidly increasing network device variety and data transmission requirements diversity. Industrial MTC applications for remote wireless control of heavy machinery in remote or hazardous places may need to provide extremely fast and reliable interconnectivity unforeseen in 4G standards and related technologies. Therefore, the 5G specifications are in demand to commit the relevant functionality for these applications. [13].

Amongst diverse convergence mechanisms, the Ethernet is appealing technology becoming de facto vehicle for Internet transport deployment at the access, aggregation, and even core levels [14]. The key benefits of that are ubiquity, simplicity and scalability for integration across different system hierarchy. Recently, virtual private LAN services (VPLS) appeared in metro Ethernet services by the advent of conventional MPLS; this requires a new inter-domain technique.

The autonomous network's interoperability concerns largely related to mobile transport evolution. According to [14], one of the biggest cost challenge facing mobile service providers today is the backhaul transport. However, existing industry solutions, tailored for circuit-switch paradigm of hub-and-spoke connectivity between cell sites and centrally located radio controllers, are not conducive to meet fixed/mobile convergence. Eventually, the seamless interworking between the mobile packet core and backhaul transport infrastructure remains to be a great challenge for next few decades.

Objectives. Summarizing the cited publications we note that circuit-switched systems (largely associated with telephony) and modern Internet, still occupy different niches in telecom market as poor VoIP quality and call latency hamper the “all over IP” progress. This poses research challenges in protocol stack unification and network interoperability as IP is not sufficient protocol for network integration on the core and aggregation levels for real time applications. In particular, bandwidth allocation and resource scheduling are to become modern key business drivers.

The goal of this work is development a uniformed method of hybrid packet/circuit switched resource scheduling for QoS-aware multiservice network interaction in converged system architecture.

Advanced internetworking design. The modern Internet is based on the TCP/IP four-layer model wherein IPv4 or IPv6 is the key internetworking protocol. It means that, regardless of internal framework, any autonomous system (AS) must be compatible with a partner network facilitating IP transactions. This resulted in stochastic time delays and packet loss which hinder the QoS provision. To overcome this problem we introduce a QoS-aware packet based internetworking method with a mechanism of packet delivery latency control.

Take an arbitrary AS with four ports $P_1 - P_4$ connected in physical ring topology, fig.1, a. Assume ports $P_1 - P_4$ form backhaul AS infrastructure. Define internal AS “zero-port” P_0 connected with $P_1 - P_4$. Map the ring backhaul in a virtual mesh topology backhaul, fig.1, b. The open network graph in fig.1, b is built by means of three types of virtual links:

a) Directed open physical links divided in duplex virtual channels with asymmetric simplex capacities $(C_1^{In}, C_1^{Out}) \div (C_4^{In}, C_4^{Out})$; these links determine the maximal possible peak value of input/output traffic intensity between the autonomous system and its open environment individually for any AS port;

b) Directed virtual links between any pair of border gateway ports $P_1 - P_4$ with asymmetric simplex capacities $(C_{km}, C_{mk}), k, m = 1, 2, 3, 4$; these links determine the maximal possible peak value of direct/reverse transit traffic intensity between any two ports P_k, P_m ;

c) Directed virtual links between any border gateway port $P_1 - P_4$ and internal part of AS (port P_0) with asymmetric simplex capacities $C_{k0}, C_{0k}, k = 1, 2, 3, 4$; these links determine the maximal possible peak value of input/output traffic intensity between the internal part of AS and open environment individually for any AS port.

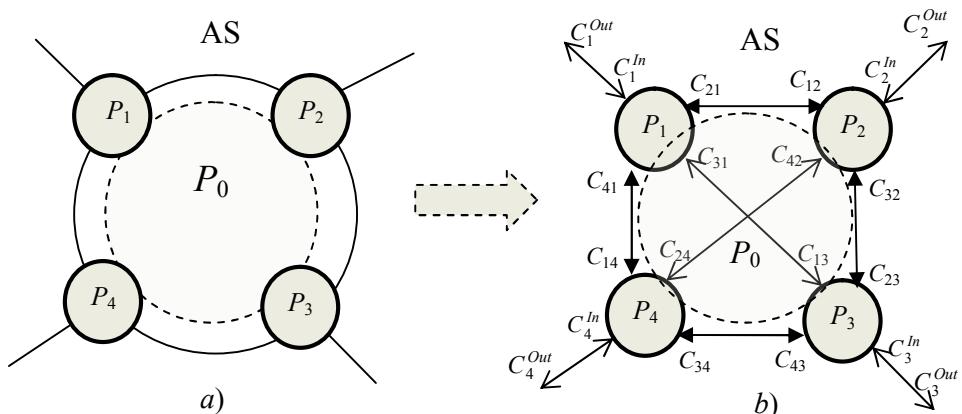
Fig. 1, c presents aforesaid open network graph in matrix form, wherein C_0^{In} is current virtual channel capacity for the traffic generated by external environment towards internal part of AS (e.g. targeting port P_0); C_0^{Out} is current virtual channel capacity for the traffic generated by internal part of AS (port P_0) towards external environment of AS:

$$C_0^{In} = \sum_{k=1}^4 C_{k0}, \quad C_0^{Out} = \sum_{k=1}^4 C_{0k}. \quad (1)$$

Based on the matrix graph in fig. 1, c we define the scalar and vector network metrics divergence (D_{Local}^{Scalar} , D_{Local}^{Vector}) for AS-local traffic throughput:

$$D_{Local}^{Scalar} = C_0^{Out} - C_0^{In}, \quad (2)$$

$$D_{Local}^{Vector} = (C_{0k} - C_{k0}), \quad k = 1, 2, 3, 4. \quad (3)$$



C	Ext	P_0 (AS)	P_1	P_2	P_3	P_4
Ext		C_0^{In}	C_1^{Out}	C_2^{Out}	C_3^{Out}	C_4^{Out}
P_0 (AS)	C_0^{Out}	\sum	C_{01}	C_{02}	C_{03}	C_{04}
P_1	C_1^{In}	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
P_2	C_2^{In}	C_{20}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}
P_3	C_3^{In}	C_{30}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}
P_4	C_4^{In}	C_{40}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}

Fig. 1. Virtualization of the connected network topology:

- a) Physical network topology graph;
- b) Virtualized mesh network topology graph;
- c) Virtualized weighted directed network graph

Each element $c_{km} \in C_{AS}^{Transit}(k, m)$ of matrix $C_{AS}^{Transit}$ we leverage as a virtual simplex channel (VSC) θ_{km} wherein the following axioms are valid.

Axiom 1: Any couple of AS ports is equipped with two directed virtual simplex channels which form an asymmetric or symmetric duplex virtual channel; any virtual simplex channel has predefined virtual throughput and regular time delay of transit packet through AS.

Axiom 2: Any virtual simplex channel is performed on the data link layer due to periodic circulation of “conveyor transporting modules” (CTM) with fixed frequency; the module payload of CTM is instantly variable from maximal possible value to zero (default CTM); the virtual channel throughput is defined by maximal CTM payload and CTM circulation frequency.

Axiom 3: The optional characteristics of any virtual simplex channel (time delay, circulation frequency and virtual throughput) are smooth functions of the current time and therefore, can be taken as stationary parameters within the local time interval.

To clarify given axioms we consider the following reasoning. One of the possible ways to construct a conveyor transporting module CTM is utilizing the standard Ethernet frame with maximal payload of 1500 bytes. In 1 Gbps physical channel the maximal frequency of CTM circulation is of about 80 KHz. This axiomatic basis defines a cross-layer system architecture that unifies L2 and L3 OSI layers.

QoS-based resource scheduling in packet channel. Based on aforesaid axioms we define multimedia queuing function (MQF) that embodies the L2/L3 cross-layered system interaction while processing two types of queues to be multiplexed in a channel: a) real time queues (RTQ) for virtual end-to-end connection; b) packet data queues (PDQ) which are tolerant to the overall time delay (fig. 2). RTQ and PDQ queues can get performance due to integrated network device of extended functionality, which combines properties of TDM, switching and packet routing [15].

The multimedia queuing function MQF operates with the so called RTQ-table shown in fig. 2, a. This table indicates that real time queue number 1 (RTQ-1) leverages segments of 8 unit size (i.e. 8 octets) which are to be inserted into the conveyor transporting modules with the frequency $f/\lambda = f/2$ (e.g. any second CTM module must have reserved slot to allocate the real time segment RTQ-1 of 8-units along with the multiplexing overhead. Similarly, any fourth CTM module must have a reserved slot for RTQ-2 of 10 units along with overhead needed. In case the module payload MPL is 100 units, two virtual connections (RTQ-1, RTQ-2) along with one packet data queue (PDQ-1) established and 1 unit overhead, we obtain the diagram of channel scheduling shown in fig. 2, b.

All the odd CTM modules in fig. 2, b are available to allocate 100 units information from the packet data queue PDQ-1; any fourth CTM contains two real time segments (8+1=9 units from RTQ-1 and 10+1=11 units from RTQ-2) and therefore, 100–(9+11)=80 units are available for packet data queue allocation; any other CTM module (e.g. number 2, 6, 10, 14, ...) give 100 – 9 = 91 units free for PDQ data. In our case, the scheduling diagram is periodic with 4 CTM cycling. In general case, the cycling period is calculated as least common multiple for all the frequency dividing factors in RTQ table.

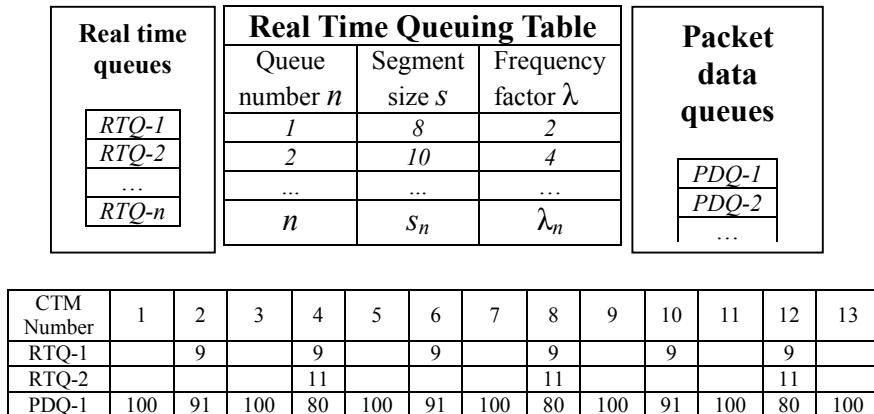
To guaranty that none of RTQ segment be pending for service more than CTM circulation period, the following condition must be satisfied:

$$\sum_n s_n < MPL_{\max} - Overhead, \quad (4)$$

where s_n is the size of real time segment arrived to the RTQ-n queue; MPL_{\max} is maximal size of conveyor transporting module CTM; $Overhead$ is the overall overhead of the multimedia data encapsulation (including all the real time and packed data segments). The condition (4) must be verified for any couple of nodes within the transporting path.

Now, for any two ports of an autonomous transporting network (or sub-network) the local time delay for real time data is limited through the following relation: $\Delta T_n < \Delta t_n + \theta_n = \frac{\lambda_n}{f} + \theta_n$, where θ_n is the regular time delay of data transmission with respect to data flow associated with real time queue RTQ-n in fig. 2. For instance, if diameter of transporting network does not exceed 200 Km, the CTM circulation frequency is $f = 80KHz$ and frequency factor is $\lambda = 80$, then $\Delta T_n < 2ms$.

Conclusion. The end-to-end resource reservation for the QoS-aware real time packet data transmission is a complex problem arising at the edge of autonomous systems. Eventually, neither IP-based resource reservation protocols nor SDN solutions demonstrate promising achievements in reliable voice/video communication over the Internet which can be actually competitive to circuit switched TDM domain performance. Analysis testifies that decisive step ahead is needed to advance open system interconnection model and protocols for extended IMS evolution.



CTM Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RTQ-1		9		9		9		9		9		9	
RTQ-2				11				11				11	
PDQ-1	100	91	100	80	100	91	100	80	100	91	100	80	100

Fig. 2. The multimedia queuing function MQF

In this work, an axiomatic basis for enhanced packet based internetworking design is formulated to combine QoS-aware synchronous time division multiplexing and asynchronous packet-switching with statistical multiplexing technique. An appropriate cross-layer method originated to leverage integrated heterogeneous data flow in a converged digital channel based on cyclic conveyor module resource scheduling. Proposed method facilitates QoS-fair queuing performance and real time data latency control in a packet channel.

References:

1. Srikanth, Jagabathula and Shah, D. (2010), "Fair Scheduling in Networks through Packet Election", available at: <http://arxiv.org/pdf/0808.2530.pdf>.
2. RFC 2205 (1997), "Resource reservation protocol (RSVP) – version 1 functional specification", available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc2205>.
3. RFC 4094 (2005), "Analysis of existing Quality of Service signaling protocols", available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc4094>.
4. Erkka Honkavaara (2008), "Cost of deploying new technologies", available at: www.cse.hut.fi/en/publications/B/1/papers/Honkavaara_final.pdf.
5. Rifai, M., Lopez-Pacheco, D. and Urvoy-Keller, G. (2015), "Coarse-grained Scheduling with Software-Defined Networking Switches", available at: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2015/pdf/papers/p95.pdf>.
6. Cox, C. (2014), "An introduction to LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications, second edition", *John Wiley & Sons, Ltd.*, 449 p.
7. "IP-Multimedia Subsystem", available at: www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/109-ims.
8. Cisco Systems, Inc. (2003), *Internetworking Technologies Handbook, 4-th Editio*, Cisco Press, 1128 p.
9. Tanenbaum, A.S. and Wetherall, D.J. (2011), *Computer Networks, 5-th Edition*, Prentice Hall PTR, 938 p.
10. "The Evolution of IMS", available at: www1.huawei.com/enapp/198/hw-078982.htm.

11. Ericsson (2008), "MMTel – a standard for multimedia services over IMS", available at: www.3glteinfo.com/wp-content/uploads/2013/10/mmtel-multimedia-services-110417144651-phpapp02.pdf.
12. Tsagkaropoulos, M. (2007), "IMS Evolution and IMS Test-Bed Service Platforms", *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 3-7 Sept. 2007, Athens, Greece, pp. 1-6.
13. Marek, Sue (2016), "Verizon, AT&T miss initial VoLTE interoperability target, promise it will happen this year", available at: www.fiercewireless.com/story/verizon-att-miss-initial-volte-interoperability-target-promise-it-will-happ/2016-02-29.
14. Hardawar, D. (2014), "Verizon closes \$130B deal to buy out Vodafone's stake in Verizon Wireless today", available at: <http://venturebeat.com/2014/02/21/verizon-closes-130b-deal-to-buy-out-vodafone-s-stake-in-verizon-wireless-today/>.
15. Dohler, M. (2012), "LTE-A PHY Layer Overview & Femto Design Challenges", available at: www.youtube.com/watch?v=JyKJ4_CybiE.

Received 16.05.2016

The article is presented by doctor of technical sciences, director of the Institute of Radio, Television and Information Security of "O.S. Popov ONAT" Vasiliu E.V.

Tikhonov Victor, Dr. Tech. Sci., Professor
Odessa National Academy of telecommunications
Str. Kovalska, 1, Odessa Ukraine, 65029
Tel.: 067-752-13-90, e-mail: victor.tikhonov@onat.edu.ua

Taher Abdullah, PhD Student
Odessa National Academy of telecommunications
Str. Kovalska, 1, Odessa Ukraine, 65029
Tel.: 063-788-43-73, e-mail: abidalla_2004@yahoo.com

Tykhonova Olena, Teacher
Odessa National Academy of telecommunications
Str. Kovalska, 1, Odessa Ukraine, 65029
Tel.: 097-490-56-18, e-mail: elenatykhonova@onat.edu.ua

УДК 621.391

Конвеєрно-модульний розподіл ресурсів телекомунікаційного пакетного каналу / Тіхонов В.І., Тахер А., Тихонова О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – 2016. – №. 21 (1193). – С. 152 – 161.

Стаття присвячена дослідженню методів резервування і розподілу ресурсів каналу в мережах з пакетною комутацією. Сформульовано аксіоматичний базис для вдосконалення протоколів між-мережової взаємодії. Запропоновано міжрівневий метод обробки гетерогенного потоку даних в цифровому каналі на основі розподілу ресурсів за допомогою циклічних конвеєрних модулів. Іл.: 2. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: телекомунікаційний пакетний канал, конвеєрно-модульний розподіл ресурсів, циклічні конвеєрні модулі.

УДК 621.391

Конвеєрно-модульное распределение ресурсов телекоммуникационного пакетного канала / Тихонов В.И., Тахер А., Тихонова Е.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – 2016. – №. 21 (1193). – С. 152 – 161.

Статья посвящена исследованию методов резервирования и распределения ресурсов канала в сетях с пакетной коммутацией. Сформулирован аксиоматический базис для усовершенствования протоколов межсетевого взаимодействия. Предложен межуровневый метод обработки гетерогенного потока данных в цифровом канале на основе распределения ресурсов с помощью циклических конвейерных модулей. Ил.: 2. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: телекоммуникационный пакетный канал, конвейерно-модульное распределение ресурсов, циклические конвейерные модули.

UDC 621.391

Conveyor module resource scheduling in packet based communication channel / Tikhonov V.I., Taher A., Tykhnova O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – 2016. – №. 21 (1193). – P. 152 – 161.

The paper focuses researches on channel resource reservation and scheduling in packet based networks. An axiomatic basis for enhanced packet based internetworking design formulated. A cross-layer method originated to leverage integrated heterogeneous data flow in converged digital channel based on cyclic conveyor module resource scheduling. Figs.: 2. Refs.: 15 titles.

Keywords: communication channel, conveyor module resource scheduling, cyclic conveyor module.

О.И. ШИРЯЕВА, канд. техн. наук, в.н.с., Институт информационных и телекоммуникационных технологий МОН Республики Казахстан, Алматы, Казахстан,

Т.Г. ДЕНИСОВА, канд. мед. наук, в.н.с., Институт информационных и телекоммуникационных технологий МОН Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ИММУННОГО ОБЪЕКТА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ДОЗ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ

Рассмотрена задача моделирования стохастической искусственной иммунной системы для описания процесса терапии и влияния сульфаниламидных препаратов на организм. Разработанная математическая модель описывает формирование специфических реакций организма в зависимости от течения хронического пиелонефрита, лечение которого проводится сульфаниламидными препаратами. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: моделирование, иммунная система, иммунный объект, терапевтические дозы, сульфаниламидные препараты.

Постановка проблемы и анализ литературы. Методы разработки лекарственных препаратов на основе современных методов искусственного интеллекта и иммунных систем относятся к инновационным и эффективным технологиям создания лекарственных средств. В настоящее время основные закономерности и механизмы работы искусственных иммунных систем (ИИС) используются для оценки и прогноза динамики популяций иммунокомпетентных клеток в виде управляемых математических моделей [1]. Данные модели позволяют исследовать защитные механизмы организма на влияние патогенов [2].

В [3] разработана методология для построения программ лечения таких сложных иммунных заболеваний, как ВИЧ, улучшающих результаты лечения за счёт использования математических технологий при одновременном снижении объёма лекарственных препаратов.

Для терапии глиом приведены результаты моделирования с решением задачи поиска оптимальной стратегии терапии, то есть поиска такой дозы и такого времени принятия лекарства, чтобы в конечный момент времени общее количество глиомных клеток было минимальным [4]. Результаты применения ИИС позволяют получить методики диагностики заболеваний [5, 6], эффективности применения вакцинаций [7, 8], количественной оценки терапевтической ценности инновационных лекарственных препаратов [9].

Для разработки иммунной модели реакции организма на лекарственные препараты необходимо учитывать неопределенность в описании параметров, обусловленную характером протекающих в организме процессов. В настоящее время существуют различные методы представления неопределенности в моделях ИИС [9, 10]. Однако, существуют некоторые трудности использования наработанных иммунных моделей, связанные с дефицитом и гетерогенностью информации при воздействии лекарственных препаратов на организм человека. Поэтому более предпочтительным является статистический подход, так как он основан на значительно меньшей информации.

В связи с этим актуальна разработка стохастической математической модели искусственной иммунной системы, функционирующей в условиях априорной неопределенности, с использованием статистического анализа. Разработанная математическая модель должна описывать формирование специфических реакций организма на терапию сульфаниламидами, в зависимости от течения такого заболевания, как хронический пиелонефрит.

Цель статьи – разработка модели стохастической искусственной иммунной системы формирования терапевтических доз сульфаниламидов при терапии пиелонефрита с использованием статистического анализа для оценки параметров модели.

Стохастическая искусственная иммунная модель терапии пиелонефрита сульфаниламидами. За последние годы использование сульфаниламидов в клинической практике значительно снизилось, поскольку по активности они значительно уступают современным антибиотикам и обладают высокой токсичностью. Существенным является и то, что в связи с многолетним использованием сульфаниламидов большинство микроорганизмов выработало к ним резистентность. Однако для лечения некоторых болезней антибиотики противопоказаны. В соответствии с этим, в данной статье рассматривается такое заболевание, как хронический пиелонефрит, при котором используются сульфаниламидные препараты [11].

Для построения стохастической математической модели терапии организма сульфаниламидами необходимо выделить переменные и параметры, которые описывают динамику течения болезни и обуславливают ее стохастический характер.

Одна из составляющих модели – описание динамики процесса влияния сульфаниламидов на организм. Существующие сульфаниламидные средства различаются по фармакологическим параметрам [12]. В зависимости от таких свойств, как всасываемость из желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и длительность выведения из

организма сульфаниламиды можно разделить на 4 группы [13], при этом показателем скорости выведения служит величина T50%, или T_{1/2} – период полувыведения, то есть время снижения максимальной концентрации в крови в 2 раза. Различают сульфаниламиды с хорошей всасываемостью – кратковременного действия; средней длительности действия; длительного действия; сверхдлительного действия; сульфаниламиды с плохой всасываемостью – сульфаниламиды, плохо всасывающиеся из желудочно-кишечного тракта и медленно выделяющиеся из организма.

Для построения модели иммунной системы терапии пиелонефрита представим переменную L , как количественное представление ресурсов организма (переменная связана с симптомами хронического пиелонефрита, зависит от количества лейкоцитов, активных лейкоцитов, СОЭ); P – изменение количества микроорганизмов при пиелонефrite в зависимости от времени (связана с бактериурой и присутствием микроорганизмов); C – изменение количества обнаруженных микроорганизмов и угнетение, за счет сульфаниламидов, у микробов ферmenta, синтезирующего фолиевую кислоту, которая является для микроорганизмов фактором роста и размножения.

В этом случае математическая модель терапии пиелонефрита описывается уравнениями ИИС, связывающей динамики изменения L , P , C [14]:

$$\begin{cases} \frac{dL(t)}{dt} = (-\gamma - fP(t) - gC(t))L(t), \\ \frac{dP(t)}{dt} = (-\beta + \lambda(1/L(t)) - \rho C(t))P(t), \\ \frac{dC(t)}{dt} = (-\alpha + \eta P(t))C(t), \end{cases} \quad (1)$$

где γ – темп естественного прироста ресурсов организма; f – количество ресурсов для микроорганизма; g – количество ресурсов организма для реакции на сульфаниламиды, оценивает побочное влияние препарата; β – темп изменения количества микроорганизмов при отсутствии ресурсов организма; $-\beta + \lambda$ – каскадный рост количества микроорганизмов за счет ресурсов; ρ – вероятность обнаружения микроорганизма; α – коэффициент, связанный с длительностью выведения из организма сульфаниламидов; η – терапевтическая доза сульфаниламидов с учетом длительности выведения их из организма.

Параметр ρ модели (1) является случайным параметром, обуславливающим стохастический характер модели и в связи с этим

возникает задача оценки данного параметра, для решения которой используется статистический анализ.

Развитие статистического анализа данных для оценки количества зараженных клеток осуществляется на основе случайной выборки [15]. В действительности не известно точное число уязвимых клеток и в результате геометрическое распределение не применимо.

Для моделирования процесса распространения микроорганизмов при пиелонефrite, с выборкой n из m микроорганизмов, выберем закон биномиального распределения. Данное распределение используется в тех случаях, когда исследуемая совокупность элементов настолько велика, что возвращаемые выборки не влияют на вероятность других выборок и вероятности, связанные со всеми образцами, равны

$$P(m) = \binom{n}{m} p^m (1-p)^{n-m}, \quad (2)$$

формула математического ожидания для которого равна np , где p – плотность уязвимости. Для оценки параметра используется интервал Клоппер-Персона [15].

Результаты моделирования процессов терапии хронического пиелонефрита. На основе разработанной модели (1), с учетом оценки случайного параметра (2), получим результаты моделирования трех фаз хронического пиелонефрита, которые классифицируются по активности воспалительного процесса в почке (в данной статье, в качестве симптомов, рассмотрим СОЭ и бактериурию):

I. Фаза активного воспалительного процесса:

- а) СОЭ – выше 12 мм/час у 50 – 70% больных;
- б) бактериурия – 100 000 ед. и более в 1 мл мочи.

II. Фаза латентного воспалительного процесса:

- а) СОЭ – не выше 12 мм/час;

- б) бактериурия отсутствует либо не превышает 10 000 в 1 мл мочи.

III. Фаза ремиссии, или клинического выздоровления:

- а) СОЭ – менее 12 мм/час;

- б) бактериурия отсутствует.

Приведем начальные условия и параметры для моделирования процессов хронического пиелонефрита с терапией сульфаниламидными препаратами первой группы (кратковременного действия): $L_0 = 5$ мм/час, $P_0 = 10$ ед., $C_0 = 1$ ед., $\alpha = -0.0001$, $\beta = -0.0001$, $\gamma = -0.0001$, $f = -0.0001$, $g = 0.0001$, ρ – случайный параметр с биномиальным законом распределения, $\eta = 1$.

Результаты моделирования трех фаз хронического пиелонефрита на основе искусственной интеллектуальной модели (1), полученные в среде MATLAB, представлены на рис. 1.

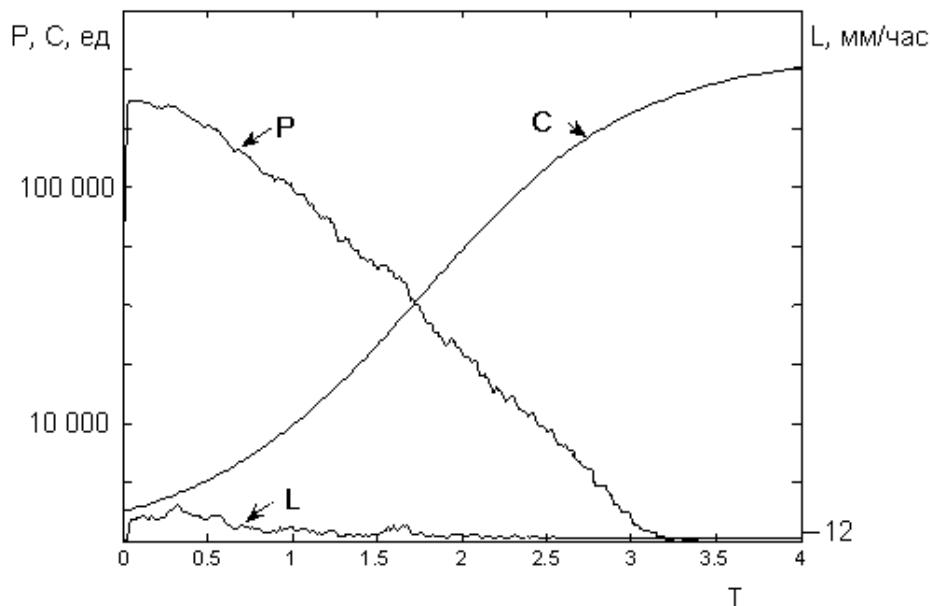


Рис. 1. Результаты моделирования

В соответствии с рис. 1, модель адекватно описывает стохастический процесс протекания хронического пиелонефрита с терапией сульфаниламида первой группы: первая фаза ($T = \overline{0, 1}$) с количеством микроорганизмов выше 100000 ед. и СОЭ превышающим 12 мм/час; вторая фаза ($T = \overline{2, 3}$) с количеством микроорганизмов около 10000 ед. и СОЭ не выше 12 мм/час; третья фаза ($T = \overline{3, 4}$) с отсутствием микроорганизмов и СОЭ менее 12 мм/час.

Выводы. С целью решения актуальной задачи развития искусственных иммунных систем для разработки лекарственных препаратов, впервые предложено использовать аппарат ИИС и методы статистического анализа для моделирования протекания процессов терапии сульфаниламидными препаратами.

Разработана адекватная математическая модель стохастической искусственной иммунной системы терапии пиелонефрита, для определения случайных параметров которой применяется статистический анализ. Дальнейшие исследования в данном направлении связаны с задачами выработки оптимальных терапевтических доз лекарственных препаратов на основе разработанной модели.

Исследования выполнены по гранту №ГР 0115PK00549 МОН РК по теме: Компьютерный молекулярный дизайн лекарственных препаратов на основе иммунносетевого моделирования (2015 – 2017 гг.).

Список литературы: 1. Dasgupta D. Recent Advances in Artificial Immune Systems: Models and Applications / Dasgupta D., Yu S., Nino F. // Applied Soft Computing Journal. – 2011. – Vol. 11. – P. 1574-1587. 2. Murray J.D. Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications / Murray J.D. – New-York: Springer, 2003. – 150 p. 3. Величенко В.В. Возможности искусственного интеллекта и компьютерных технологий в построении программ лечения сложных иммунных заболеваний / В.В. Величенко, Д.А. Притыкин // Фундаментальная и прикладная математика. – 2009. – Т. 15. – № 5. – С. 21-42. 4. Коваленко С.Ю. Оценки критерия оптимальности в задаче моделирования терапии глиом / С.Ю. Коваленко, А.С. Братусь // Математическая биология и биоинформатика. – 2014. – Т. 9. – № 1. – С. 20-32. 5. Zhao W. A modified artificial immune system based pattern recognition approach – An application to clinical diagnostics / Zhao W., Davis C.E. // Artificial Intelligence in Medicine Journal. – 2011. – Vol. 52. – P. 1-9. 6. Er O. Diagnosis of chest diseases using artificial immune system / O. Er, N. Yumusak, F. Temurtas // Expert Systems with Applications Journal. – 2012. – Vol. 39. – P. 1862-1868. 7. Bianca C. The triplex vaccine effects in mammary carcinoma: A nonlinear model in tune with SimTriplex / Bianca C., Pennisi M. // Journal of Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2012. – Vol. 13, – P. 1913-1940. 8. Bianca C. On the modeling of genetic mutations and immune system competition / Bianca C., Delitala M. // Journal of Computers & Mathematics with Applications. – 2011. – Vol. 61. – P. 2362-2375. 9. Polat K. Corrigendum to Diagnosis of heart disease using artificial immune recognition system and fuzzy weighted pre-processing / K. Polat, S. Güneş, S. Tosun // Journal of Pattern Recognition. – 2006. – Vol. 39 (11). – P. 2186-2193. 10. Shamshirband S. Tuberculosis Disease Diagnosis Using Artificial Immune Recognition System / S. Shamshirband, S. Hessam, H. Javidnia, M. Amribesheli, S. Vahdat, D. Petković, A. Gani, M. Kiah // International Journal of Medicine Science. – 2014. – Vol. 11 (5). – P. 508-514. 11. Фадеев П.А. Болезни почек. Пиелонефрит / П.А. Фадеев // – М.: Мир и Образование, 2012. – 120 с. 12. Surhone L. Sulfanilamide (Medicine) / L. Surhone, M. Timpson, S. Marseken. – New-York: Betascript publishing, 2012. – 64 p. 13. Shirayayeva O.I. Investigation of artificially immune system with using of fuzzy logic / O.I. Shirayayeva, T.G. Denisova // Новосибирск: Вычислительные технологии (совместный сборник журналов с "Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика"). – 2015. – С. 209-217. 14. Ширяева О.И. Моделирование влияния лекарственных препаратов на организм человека на основе подхода искусственных иммунных систем: монография / О.И. Ширяева. – Алматы: TST-Company. – 2014. – 90 с. 15. Ширяева О.И. Робастные и инвариантные системы: учебное пособие / О.И. Ширяева. – Алматы: КазНТУ. – 2010. – 163 с.

References:

1. Dasgupta, D., Yu, S. and Nino, F. (2011), "Recent Advances in Artificial Immune Systems: Models and Applications", *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 11, pp. 1574-1587.
2. Murray, J.D. (2003), *Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications*, Springer, New-York, 150 p.
3. Velichenko, V.V. and Pritykin, D.A. (2009), "Of artificial intelligence and computer technologies for developing treatment programs for complex immune diseases", *Journal of Fundamental and Applied Mathematics*, Vol. 15, № 5, pp. 21-42.
4. Kovalenko, S.Ju. and Bratus', A.S. (2014), "Estimates of the optimality criterion in the treatment of gliomas modeling problem", *Journal of Mathematical Biology and Bioinformatics*, Vol. 9, №1, pp. 20-32.

5. Zhao, W. and Davis, C.E. (2011), "A modified artificial immune system based pattern recognition approach – An application to clinical diagnostics", *Artificial Intelligence in Medicine Journal*, Vol. 52, pp. 1-9.
6. Er, O., Yumusak, N. and Temurtas, F. (2012), "Diagnosis of chest diseases using artificial immune system", *Expert Systems with Applications Journal*, Vol. 39, pp. 1862-1868.
7. Bianca, C. and Pennisi, M. (2012), "The triplex vaccine effects in mammary carcinoma: A nonlinear model in tune with SimTriplex", *Journal of Nonlinear Analysis: Real World Applications*, Vol. 13, pp. 1913-1940.
8. Bianca, C. and Delitala, M. (2011), "On the modeling of genetic mutations and immune system competition", *Journal of Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 61, pp. 2362-2375.
9. Polat, K., Güneş, S. and Tosun, S. (2006), "Corrigendum to Diagnosis of heart disease using artificial immune recognition system and fuzzy weighted pre-processing", *Journal of Pattern Recognition*, Vol. 39 (11), pp. 2186–2193.
10. Shamshirband, S., Hessam, S., Javidnia, H., Amiribesheli, M., Vahdat, S., Petković, D., Gani, A. and Kiah, M. (2014), "Tuberculosis Disease Diagnosis Using Artificial Immune Recognition System", *International Journal of Medicine Science*, Vol. 11(5), pp. 508-514.
11. Fadeev, P.A. (2012), *Kidney disease. Pyelonephritis*, Peace and Education, Moscow, 120 p.
12. Surhone, L., Timpledon, M. and Marseken S. (2012), "Sulfanilamide (Medicine)", Betascript publishing, New York, 64 p.
13. Shiryayeva, O.I. and Denisova, T.G. (2015), "Investigation of artificially immune system with using of fuzzy logic", *Journal of Computational technologies*, pp. 209-217.
14. Shiryayeva, O.I. (2014), *Modelirovanie vlijanija lekarstvennyh preparatov na organizm cheloveka na osnove podkhoda iskusstvennyh imunnnyh sistem: monografija*, TST-Company, Almaty, 90 p.
15. Shiryayeva O.I. (2010), *Robust and invariant systems: a tutorial*, KazNTU, Almaty, 163 p.

Поступила (received) 06.05.2016

Статью представил д-р техн. наук, проф. КазНИТУ им. К. Сапаева Сулейменов Б.А.

Shiryayeva Olga, Cand. Tech. Sci., Leading Researcher
Institute of Information and Computing Technologies of ESM of Kazakhstan Republic
Str. Pushkin, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010
Tel: +7 (727) 272-37-11, e-mail: shiryayeva@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2532-0636

Denisova Tatyana, Cand. Med. Sci., Leading Researcher
Institute of Information and Computing Technologies ESM of Kazakhstan Republic
Str. Pushkin, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010
Tel: +7 (727) 272-37-11, e-mail: elkaz41@mail.ru

УДК 004.89:004.4

Моделювання стохастичного імунного об'єкта формування терапевтичних доз лікарських препаратів / Ширяєва О.І., Денісова Т.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 162 – 169.

Розглянуто задачу моделювання стохастичною штучної імунної системи для опису процесу терапії і впливу сульфаниламідних препаратів на організм. Розроблена математична модель описує формування специфічних реакцій організму в залежності від перебігу хронічного піелонефриту, лікування якого проводиться сульфаниламідними препаратами. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: моделювання, імунна система, імунний об'єкт, терапевтичні дози, сульфаниламідні препарати.

УДК 004.89:004.4

Моделирование стохастического иммунного объекта формирования терапевтических доз лекарственных препаратов / Ширяева О.И., Денисова Т.Г. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 162 – 169.

Рассмотрена задача моделирования стохастической искусственной иммунной системы для описания процесса терапии и влияния сульфаниламидных препаратов на организм. Разработанная математическая модель описывает формирование специфических реакций организма в зависимости от течения хронического пиелонефрита, лечение которого проводится сульфаниламидным препаратами. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: моделирование, иммунная система, иммунный объект, терапевтические дозы, сульфаниламидные препараты.

UDC 004.89:004.4

Modeling of stochastic immune object of therapeutic doses forming of medicine / Shiryayeva O.I., Denisova T.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 162 – 169.

The problem of stochastic simulation of artificial immune system to describe the process of therapy and the effect of sulfonamides in the body. The developed mathematical model describes the formation of the specific reactions of the body, depending on the course of chronic pyelonephritis, treatment is carried sulfonamides. Refs.: 15 titles.

Keywords: modeling, immune system, immune object, therapeutic dose, carried sulfonamides.

В.И. ШУЛЬГИН, канд. техн. наук, проф., НАУ "ХАИ", Харьков,
О.Н. АНТОНЧИК, асп., НАУ "ХАИ", Харьков

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПЛОДА И МАТЕРИ В ХОДЕ БЕРЕМЕННОСТИ

Рассматривается новая технология осуществления мониторинга состояния матери и плода в ходе беременности, основанная на обработке электрических сигналов, регистрируемых на поверхности тела беременной женщины в абдоминальной области (технология абдоминального мониторинга). Показаны алгоритмы обработки многоканального абдоминального сигнала для выделения и измерения параметров ЭКГ плода и маточной активности. Предложена общая структурная схема, объединяющая все эти алгоритмы в систему. Ил.: 3. Библиогр.: 24 назв.

Ключевые слова: абдоминальный мониторинг, ЭКГ плода, маточная активность, электрические сигналы.

Постановка проблемы. Гипоксия плода и преждевременные роды составляют наиболее серьезные проблемы протекания беременности, и статистика этих нарушений во всем мире, к сожалению, имеет тенденцию к росту [1]. Своевременная диагностика и постоянный мониторинг состояния матери и плода в ходе беременности позволяют существенно снизить риски, связанные с этими нарушениями.

Действующие на сегодняшний день протоколы наблюдения за течением беременности основаны на применении ультразвука (УЗИ, КТГ), но они имеют ряд недостатков, и, к тому же, не абсолютно безопасны [2]. В связи с этим не прекращается поиск новых, более точных и безопасных методов мониторинга системы мать/плод.

Альтернативой ультразвуковым методам мониторинга плода и маточной активности (МА) может служить, так называемый, абдоминальный мониторинг – новая технология, быстро развивающаяся в последние годы, и основанная на обработке электрических потенциалов микровольтового диапазона, регистрируемых на поверхности тела беременной женщины в абдоминальной области [3]. Технология является абсолютно безопасной, пассивной, то есть не связанной с какими-либо излучениями, воздействующими на плод, может применяться в течение продолжительных интервалов времени (суточный и многосуточный мониторинг) как в условиях клиники, так и на дому. Однако она требует разработки сложных алгоритмов обработки многоканальных биоэлектрических сигналов, а также устройств регистрации и беспроводной передачи этих сигналов.

Анализ литературы. Анализ публикаций, посвященных

разработке методов и технических средств, обеспечивающих решение поставленной проблемы показывает, что основными методами изучения сердечного ритма плода, показатели которого отражают наличие гипоксии, являются: ультразвуковая допплерография (УЗ) [2, 4], кардиотокография (КТГ) [5], фонокардиография (ФКГ) [6], магнитокардиография (МКГ) [7], и электрокардиография (ЭКГ) [8 – 12]. Стандартами клинического применения сегодня являются методы, базирующиеся на УЗ и КТГ. Не останавливаясь на причинах доминирования этих методов, назовем их главные недостатки.

Во-первых, обеспечиваемая ими точность определения сердечного ритма плода недостаточна для детального анализа ("beat to beat" – от удара к удару) характера и вариабельности сердечного ритма (BCP).

Во-вторых – крайне нежелательна многократная и длительная регистрация из-за возможного неблагоприятного воздействия ультразвукового излучения на развивающийся плод. На самом деле, влияние ультразвука на организм еще не до конца изучено, и многими специалистами высказываются сомнения в его абсолютной безвредности. Во многих же случаях для получения достоверных результатов требуются продолжительные интервалы мониторинга сердечной активности плода (до часа и более).

Новым методом количественного анализа сердечного ритма плода является, так называемая, абдоминальная электрокардиография плода (ЭКГП), выполняемая посредством наложения электродов на переднюю брюшную стенку беременной женщины, регистрации и выделения ЭКГП из сложной смеси сигналов, регистрируемых на теле матери, и ее анализа. Однако этот способ требует использования достаточно сложных методов обработки регистрируемых сигналов, поскольку ЭКГП в этом случае имеет чрезвычайно низкий уровень, и наблюдается на фоне большого числа помех, артефактов и значительно более высоковольтной электрокардиограммы матери (ЭКГМ). В то же время метод абсолютно безопасен для матери и плода и сравнительно прост в практическом применении. Более того, данный метод позволяет осуществлять многократный и долговременный мониторинг ЭКГП в домашних условиях для пациенток с высокой степенью риска, что вообще невозможно при использовании УЗ-методов наблюдения. Наконец, электрокардиография плода позволяет производить анализ не только ритма, но и дополнительно – морфологических показателей ЭКГП, таких как PR- и PQ-интервалы, ширина QRS-комплекса, изменения Т-волны и ST-сегмента, что может обеспечить дополнительную информацию о состоянии сердца плода.

К сожалению, технология электрокардиографического мониторинга плода еще не вошла в медицинскую практику, в том числе в Украине, где

о ней практически не знают. Анализ публикаций последних лет свидетельствует о том, что в Украине подобные работы на сегодняшний день практически не ведутся, или находятся на начальной стадии. Поэтому, чрезвычайно актуальными являются исследования с целью разработки аппаратуры для многоканальной регистрации ЭКГП, эффективных методов и алгоритмов обработки сигналов, регистрируемых при абдоминальной электрокардиографии плода, разработки программных средств для выделения и анализа ЭКГ-сигналов матери и плода и оценки состояния системы "мать – плод".

Вторая сторона обсуждаемой проблемы – методы и средства измерения уровня маточной активности, в том числе – с целью оценки степени риска преждевременных родов. Традиционной технологией для мониторинга МА во время беременности и родов в настоящее время является внешняя токография [5]. Она осуществляется при помощи тензометрических датчиков, размещенных на абдоминальной поверхности беременной при помощи эластичного пояса и фиксирующих механические напряжения, обусловленные маточными сокращениями. Однако, поскольку это непрямое механическое измерение, то сигнал, полученный при помощи внешней токографии, имеет довольно низкую чувствительность по отношению к МА.

Проводимые в последние годы исследования [13 – 17] показывают, что наблюдаемый на абдоминальной поверхности (АП) миографический сигнал МА может служить хорошим инструментом для контроля сократительной активности в ходе беременности и родов, так же как для обнаружения патологических сокращений, ведущих к преждевременным родам [13, 15, 16]. В качестве признаков, характеризующих различие абдоминальных сигналов при беременности и родах, рассматривались их спектральные характеристики [14, 16]. В недавних публикациях [17], кроме этого, представлены результаты исследований, показывающих существенное изменение при приближении к родам пространственных характеристик ЭГГ сигнала, таких, как направление и скорость распространения электрической активности (скорость проведения – CV), которая может определяться на основе анализа многоканального сигнала, наблюдаемого на абдоминальной поверхности беременной женщины. Существующий аппарат теории статистического оценивания позволяет получить регулярные алгоритмы оценок частоты и скорости проведения, потенциально пригодные для клинического применения.

Цель статьи. Настоящая работа посвящена вопросам цифровой обработки многоканального абдоминального сигнала с целью выделения и оценки параметров сигналов ЭКГ матери, ЭКГ плода, а также сигнала МА. Проводимые в этой области работы имеют конечной целью

создание отечественной системы не ультразвукового мониторинга матери и плода в ходе беременности.

Основной раздел. Технология абдоминального мониторинга в самом общем виде состоит в следующем. На абдоминальную поверхность (переднюю брюшную стенку) беременной женщины накладываются электроды, с помощью которых в различных точках АП производится регистрация электрических сигналов. Снимаемый с электродов многоканальный электрический сигнал содержит множество информативных и мешающих компонент – ЭКГ матери, ЭКГ плода, сигналы миографической активности матки (МА), сетевую и мышечную помеху, артефакты двигательной активности матери и плода, и т.д. Упрощенная схема абдоминального мониторинга приведена на рис. 1.

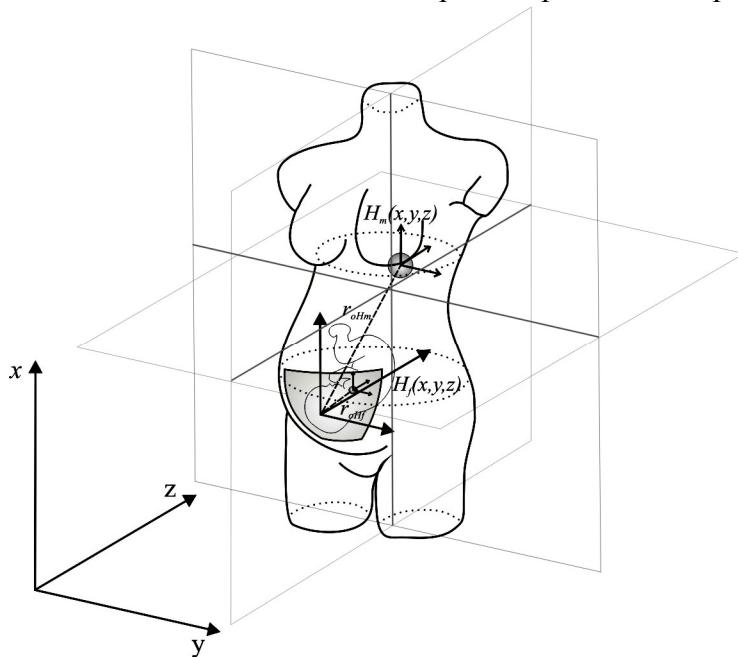


Рис. 1. Обобщенная схема абдоминального мониторинга

Для решения задач, связанных с выделением из наблюдаемой на АП смеси сигналов и помех необходимой для диагностики информации, в первую очередь, необходимо определить пространственно-временную модель наблюдаемого на АП сигнала.

Пространственно-временная модель абдоминального сигнала. Информативные компоненты абдоминального сигнала имеют биоэлектрическую природу, при описании их формирования и распространения в проводящих средах используется концепция источников токов с объемной плотностью $J_v(x, y, z, t)$. Источники

возникают в силу биоэлектрической активности нервных и мышечных клеток и преобразования энергии в них из химической в электрическую форму. Каждый элементарный биоэлектрический источник представляет собой элементарный диполь, а суммарная плотность тока источника от всех элементарных диполей является интегралом по всему объему источника [18]. Основным соотношением, связывающим электрические потенциалы в проводящей среде и на ее поверхности с плотностью тока источника, является уравнение Пуассона:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_x \frac{\partial \phi(x, y, z, t)}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma_y \frac{\partial \phi(x, y, z, t)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_z \frac{\partial \phi(x, y, z, t)}{\partial z} \right) = J_v(x, y, z, t), \quad (1)$$

где $J_v(x, y, z, t)$ – объемный источник тока с координатами x, y, z ; $\phi(x, y, z, t)$ – потенциал в точке наблюдения; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – проводимости среды в направлениях x, y и z соответственно.. Решение уравнения Пуассона в общем виде для однородной среды выглядит следующим образом:

$$U(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\sigma} \int_{V'} \frac{-\operatorname{div} \vec{J}(\vec{r}', t)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV', \quad (2)$$

где $U(r, t)$ – значение электрического потенциала в точке наблюдения; σ – проводимость; $|\vec{r} - \vec{r}'|$ – расстояние между источником и точкой наблюдения; $\vec{J}(\vec{r}', t)$ – ионный ток; V' – объем источника тока.

Согласно выражению (2) для точечного и достаточно удаленного от области наблюдения источника (это справедливо для источников ЭКГМ и ЭКГП) изменение $U(r, t)$ и $J_v(x, y, z, t)$ в различных точках АП происходит синхронно (без задержки по времени). В этом случае поле $U(r, t)$ хорошо описывается с использованием простой дипольной модели Бергера и Van Милана [18]. Для объемного источника МА, расположенного в непосредственной близости от области наблюдения (что соответствует модели электрической активности мышечной ткани [17]) поле $U(r, t)$ в точке наблюдения будет определяться, в основном, влиянием области возбуждения, находящейся в данный момент в непосредственной близости от этой точки. С перемещением области возбуждения миометрия со скоростью V_{xyz} , с такой же скоростью по АП будет перемещаться фронт волны МА. При этом направление и скорость распространения этой волны являются диагностически важными.

Спектральные характеристики компонент абдоминального сигнала. Сложность задачи обработки сигналов при абдоминальном

мониторинге определяется еще и тем, что все полезные и помеховые компоненты абдоминального сигнала имеют в значительной степени перекрывающиеся спектры – рис. 2.

Так, спектр ЭКГМ сосредоточен в основном в диапазоне частот 0,1 – 100 Гц, ЭКГП – в диапазоне 1 – 100 Гц, сигнала МА – 0,2 – 1 Гц, спектр артефактов движения – 0,1 – 10 Гц, электрической миографической активности мышц (ЭМГМ) – 10 – 100 Гц, сетевой помехи – $m(50 \pm 2 \text{ Гц})$, $m = 1, 2, \dots, 5$. При этом уровень полезного сигнала и помех в точках наблюдения неизвестен, а помехи в различных точках АП могут считаться статистически независимыми.

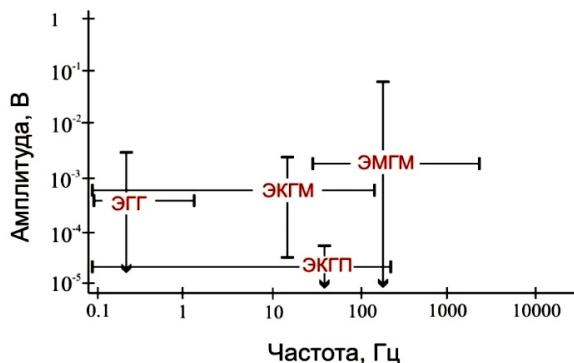


Рис. 2. Частотный состав абдоминального сигнала

Структурная схема обработки сигнала в системе абдоминального мониторинга. С учетом состава и характера регистрируемого на АП многоканального сигнала (наблюдения), его обработка в программе представляет собой многошаговую итеративную процедуру, включающую следующие этапы – рис. 3.

1. *Предварительная обработка (адаптивная фильтрация – рис. 3 а, б).* Выполняется для уменьшения уровня помех в регистрируемом многоканальном сигнале (НЧ электродных артефактов, сетевой помехи и миографических шумов), а также для разделения полезных сигналов на основе различий их спектров (ЭКГМ, ЭКГП – с одной стороны, и сигнал МА – с другой).

Несмотря на более высокую эффективность методов нелинейной обработки (медианные или а-урезанные фильтры), фильтрация производится с применением адаптивных линейных методов, поскольку нелинейные операции существенно снижают качество процедур разделения сигналов на основе их статистической независимости (ICA), используемых при выделении ЭКГП [19 – 21].

Одним из промежуточных шагов предварительной обработки является первичное обнаружение ЭКГМ, формирование усредненного

комплекса и удаление из наблюдаемой смеси компоненты ЭКГМ. Эта операция существенно повышает эффективность фильтрации сетевой помехи и НЧ артефактов. Проведенные на модели, а также большом числе реальных сигналов исследования показали высокую эффективность метода. При этом он обеспечивает наименьшую степень искажений низкочастотных составляющих ЭКГ-сигнала, наилучшее сохранение его морфологии из всех протестированных нами методов, а также полное отсутствие переходных процессов в виде "звона" при фильтрации сетевой помехи. В результате предварительной обработки регистрируемый сигнал разделяется на две многоканальных компоненты, одна из которых содержит сигналы ЭКГП и ЭКГМ, вторая – сигналы МА, дальнейшая обработка которых производится независимо друг от друга.

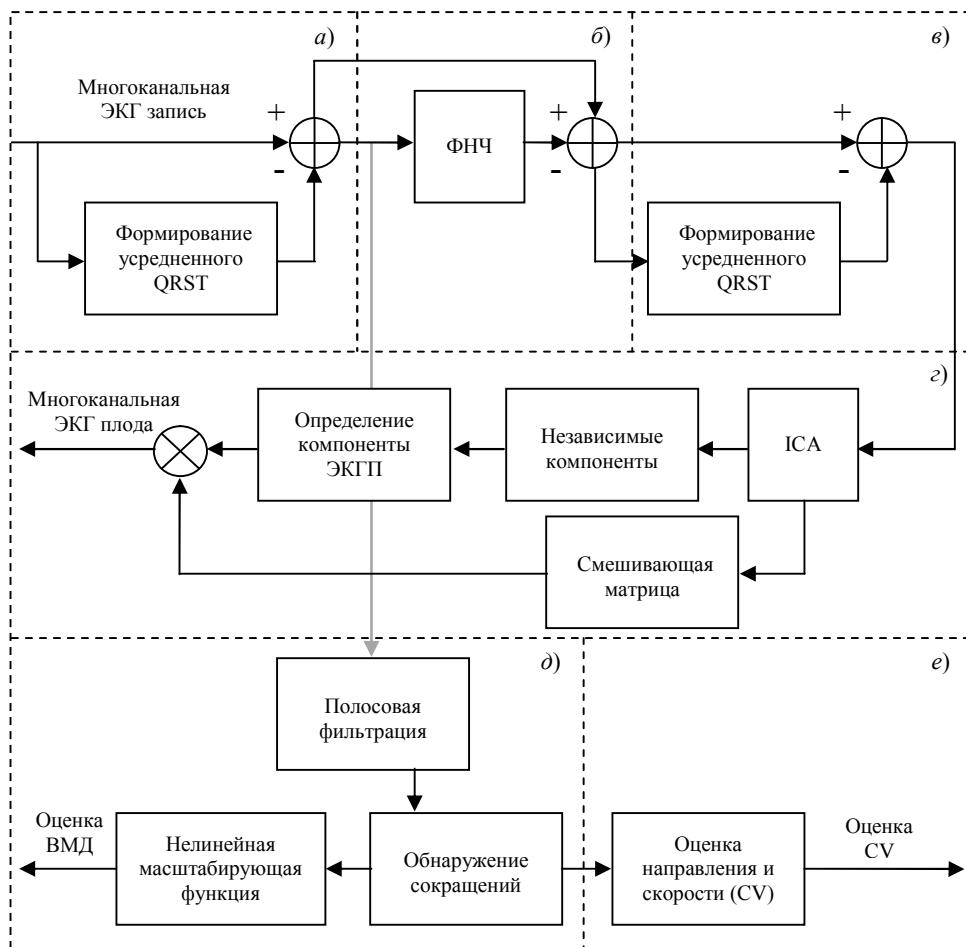


Рис. 3. Структурная схема обработки абдоминального сигнала

2. Удаление материнской ЭКГ (рис. 3, в). В связи с подобием спектральных и временных характеристик ЭКГП и ЭКГМ их разделение должно производиться на основе некоторого признака, различающего эти два источника. Таким признаком может служить их статистическая независимость, а математическим аппаратом для разделения – методы на основе анализа независимых компонент (ICA) [19, 20]. К сожалению, процедура ICA (разделения сигналов на компоненты) требует соблюдения условия – число наблюдений должно быть больше или равно числу компонент, в противном случае качество разделения существенно ухудшается, причем, в тем большей степени, чем больше компонент содержитя в наблюдении [21]. В связи с этим желательно до выполнения процедуры разделения удалить из наблюдений сигналы, характеристики которых можно определить с достаточно высокой точностью, например – квазидетерминированный сигнал ЭКГМ. Поэтому следующим шагом обработки является повторное формирование усредненного комплекса ЭКГМ (на базе уже профильтрованного сигнала, не содержащего сетевой помехи и НЧ помех), и его вычитание из абдоминальной смеси. Операция может выполняться как непосредственно над наблюдениями, так, что еще более эффективно – при переходе к составляющим их компонентам. В этом случае она выглядит следующим образом: с учетом известных моментов сердечных сокращений ЭКГМ над многоканальным абдоминальным сигналом производится операция π СА [22], выделяющая компоненты ЭКГМ по критерию максимальной периодичности, формируется усредненный комплекс компонент ЭКГМ, последний вычитается из собственно компонент, и над остатком выполняется обратная операция π СА. В результате получаем сигнал, в котором практически полностью отсутствует ЭКГМ.

3. Выделение и обработка ЭКГП (рис. 3, г). Является наиболее ответственным и сложным этапом при анализе ритма и морфологии ЭКГП. Общепринятым подходом к выделению электрокардиограммы плода из абдоминальной смеси в последнее время считается применение методов "слепого разделения источников – BSS" [23], основанных на анализе главных компонент (PCA) или независимых компонент (ICA), и представляющих собой алгебраические методы совместного оценивания ненаблюдаемых компонент по наблюдаемой смеси сигналов, а также матрицы смешивания этих компонент. Этот подход был принят для выделения ЭКГП и нами. При этом наилучший эффект был получен при использовании таких алгоритмов, как RunICA (при работе программы в режиме реального времени), а также JADE, SOBI и π СА (при постобработке сигнала). Процедура ICA применялась к остаточному (за вычетом ЭКГМ) сигналу, после применения к нему фильтрации в полосе

примерно 15 – 100 Гц, которая, как показали исследования на большом числе записей, обеспечивает наилучшее соотношение сигнал/шум при выделении ЭКГП. Поскольку программа абдоминального мониторинга предназначается для клинического применения, в ней предусмотрено автоматическое распознавание выделенной компоненты (компонент) ЭКГП. В качестве компоненты ЭКГП автоматически выбирается компонента с максимальной периодичностью, при этом вероятность правильного распознавания при достаточном для выделения компоненты отношении сигнал/шум составляет не менее 90%. В случае неправильного распознавания, наличия нескольких компонент ЭКГП или при двойне, программа дает возможность выбрать нужную компоненту вручную.

В результате выделения компоненты ЭКГП и определения моментов сердечных сокращений плода, в дополнение к уже имеющимся параметрам ЭКГМ, появляется возможность воспользоваться байесовским подходом к фильтрации – использовать более полную априорную информации о фильтруемом сигнале, полученную на предыдущих этапах обработки [19, 20, 24].

4. *Выделение сигнала маточной активности и оценка величины внутриматочного давления (ВМД)* (рис. 3, д). Сигнал маточной активности можно рассматривать, как мультиплексацию быстрых волн (потенциалов движения) с частотой от 0,1 Гц до 3 Гц и медленных волн (сокращений, которые можно увидеть на КГТ) с частотой от 0,005 Гц до 0,03. На ранних сроках беременности медленная волна отсутствует, а с приближением родов она начинает появляться сначала с небольшими частотой и амплитудой, а затем с более высокими. Таким образом, на поздних сроках беременности сигнал маточной активности представляет собой амплитудно-модулированное колебание с огибающей, соответствующей внутриматочному давлению [3]. Поэтому простейшим решением задачи детектирования МА является использование алгоритма типа амплитудной демодуляции.

Первыми этапами обработки, как и при обнаружении ЭКГП, является удаление сетевой помехи и ЭКГМ. Далее, остаточный сигнал в каждом канале подвергается полосовой фильтрации в полосе 0,3 – 0,8 Гц. Следующим шагом является формирование модуля сигнала и его сглаживание при помощи НЧ фильтра с частотой среза 0,0166 Гц, и сравнение с адаптивным порогом. Поскольку связь между уровнем МА и искомой величиной ВМД носит нелинейный характер [3], то очередным шагом обработки является нелинейное преобразование огибающей медленной волны сигнала МА в оценочную величину ВМД.

5. *Определение пространственно-временных характеристик сигнала маточной активности* (рис. 3, е). Сигнал МА возникает

вследствие реполяризации и деполяризации клеток мышечной ткани матки, то есть появления потенциала действия, который распространяется от клетки к клетке и приводит к сокращению мышцы. При этом, насколько координированное и сильное сокращение возникает (что может быть показателем готовности к родам), зависит от скорости и направления распространения сигнала, а также от количества клеток, вовлеченных в сокращение. Поскольку регистрируемый электродом сигнал представляет собой сумму потенциалов клеток, находящихся под ним и в непосредственной близости от этого электрода, а область возбуждения миометрия перемещается, соответственно движется по абдоминальной поверхности и фронт сигнала возбуждения. Используя двумерную решетку электродов, с известными межэлектродными расстояниями, можно определить скорость и направление распространения этого сигнала – так называемый вектор CV (скорость проведения), который является маркером риска преждевременных родов. Поскольку сигнал МА на АП наблюдается в присутствии помех, задача решается в рамках теории статистических решений – с использованием метода максимального правдоподобия.

Выводы. Обработка многоканального сигнала, регистрируемого на абдоминальной поверхности беременной женщины позволяет достаточно простым и щадящим способом определить характеристики сердечного ритма плода, а также показатели маточной активности матери, свидетельствующие о ее готовности к родам. В результате проделанной работы разработан набор алгоритмов и основа программного обеспечения для системы не ультразвукового абдоминального мониторинга, обеспечивающей безопасное и продолжительное наблюдение за состоянием матери и плода в ходе беременности.

Список литературы: 1. *Minino A.M. Deaths: Final data for 2004 / A.M. Minino, M.P. Heron, S.L. Murphy, K.D. Kochanek // National Vital Statistics Reports.* – 2007. – Vol. 55. – № 19. – 120 p. 2. *Wladimiro J. Ultrasound and the Fetal Heart / J. Wladimiro, G. Pilu.* – Carnforth: Parthenon Publishing. – 1996. – 120 p. 3. *Rabotti C. Characterization of uterine activity by electrohysterography: Ph.D. thesis / Chiara Rabotti //* Eindhoven: Technische University Eindhoven. – 2010. – 145 p. 4. *Peters M. Monitoring the fetal heart non-invasively: a review of methods / M. Peters, J. Crowe, J. F. Pieri [et al.] // Journal of Perinatal Medicine.* – 2001. – Vol. 29. – P. 408-416. 5. *Van Geijn H.P. Developments in CTG analysis / H.P. Van Geijn, H.J.M ter Brake, A.P. Rijpma, J.G. Stinstra // Baillière's Clinical Obstetrics and Gynaecology.* – 1996. – Vol. 10. – № 2. – P. 185-209. 6. *Kovacs F. A rule-based phonocardiographic method for long-term fetal heart rate monitoring / F. Kovacs, M. Torok, I. Habermajer // IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* – 2000. – Vol. 47. – № 1. – P. 124-130. 7. *Brake H.J.M. Fetal magnetocardiography: clinical relevance and feasibility / H.J.M. Brake, A.P. Rijpma, J.G. Stinstra [et al.] // Physica C: Superconductivity and its Applications.* – 2002. – Vol. 368. – P. 10-17. 8. *Chourasia V.S. A Review and Comparative Analysis of Recent Advancements in Fetal Monitoring Techniques / V.S. Chourasia, A.K. Tiwari // Critical Reviews in Biomedical Engineering.* – 2008. – Vol.

36. – № 5-6. – P. 335-373. **9.** Patent application number: 20120150053 USA. Apparatus and method for detecting a fetal heart rate / *B. Hayes-Gill, D. James, J. Crowe, J.-F. Pieri; Monica healthcare limited*; Publication date: 2012-06-14. **10.** *Clifford G.* Clinically accurate fetal ECG parameters acquired from maternal abdominal sensors / *G. Clifford, R. Sameni, J. Ward, J. Robinson, A.J. Wolfberg* // American Journal of Obstetrics & Gynecology. – 2011. – Vol. 205. – № 1. – P. 1-47. **11.** MindChild receives FDA pre-market clearance for MERIDIAN non-invasive fetal heart monitor, available at: <http://www.biospace.com/News/mindchild-medical-inc-files-fda-application-for/248451>
- 12.** *Larks S.D.* Present status of fetal electrocardiography / *S.D. Larks* // IRE Transactions on Bio-Medical Electronics. – 1962. – Vol. 9. – № 3. – P. 176-180. **13.** *Euliano T.Y.* Monitoring uterine activity during labor: a comparison of 3 methods / *T.Y. Euliano, M. T. Nguyen, S. Darmanjian* [et al.] // American Journal of Obstetrics & Gynecology. – 2013. – Vol. 208. – № 1. – P. 61-66. **14.** *Rabotti C.* Estimation of internal uterine pressure by joint amplitude and frequency analysis of electrohysterographic signals / *C. Rabotti, M. Mischi, J.O. van Laar, G.S. Oei, J.W. Bergmans* // Physiological Measurement. – 2008. – Vol. 29. – № 7. – P. 829-841. **15.** *Reinhard J.* Uterine activity monitoring during labour—a multi-centre, blinded two-way trial of external tocodynamometry against electrohysterography / *J. Reinhard, B. R. Hayes-Gill, S. Schiermeier* [et al.] // Zeitschrift für Geburtshilfe und Neonatologie. – 2011. – Vol. 215. – № 5. – P. 199-204. **16.** *Vinken M.P.* Accuracy of frequency-related parameters of the electrohysterogram for predicting preterm delivery: a review of the literature / *M.P. Vinken, C. Rabotti, M. Mischi, S.G. Oei* // Obstetrical and Gynecological Survey. – 2009. – Vol. 64. – № 8. – P. 529–541. **17.** *de Lau H.* Automated conduction velocity analysis in the electrohysterogram for prediction of imminent delivery: a preliminary study / *H. de Lau, C. Rabotti, R. Bijloo* [et al.] // Computational and Mathematical Methods in Medicine. – 2013. – Vol. 2013. – 7 p. **18.** *Mamivuo J.* Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields / *J. Mamivuo, R. Plonsey*. – New York: Oxford University Press. – 1995. – 600 p. **19.** *Zaderykhin O.* Blind Signal Separation Using Prior Information / *O. Zaderykhin, V. Shulgin* // Proceedings of the Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science", February 23–27. – Lviv-Slavsk, Ukraine, 2010. – P. 48. **20.** *Zaderykhin O.* Blind signal separation of fetal ECG using prior information / *O. Zaderykhin, V. Shulgin, A. Tokarev* // Proceedings of the International Congress on Electrocardiology, June 3–5. – Lund, Sweden, 2010. Journal of Electrocardiology. – Vol. 44. – P. e37. **21.** *Shulgin V.* Computer Diagnostic System for Fetal Monitoring During Pregnancy / *V. Shulgin, O. Shepel* // Proceedings of the International Conference TCSET'2014 "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science2. – February 25. – March 1. – Lviv-Slavsk, Ukraine, 2014 – P. 709-711. **22.** *Sameni R.* A Deflation Procedure for Subspace Decomposition / *R. Sameni, C. Jutten, M. B. Shamsollahi* // IEEE Transactions On Signal Processing. – 2010. – Vol. 58. – № 4. – P. 236. **23.** *Sameni R.* What ICA Provides for ECG Processing: Application to Noninvasive Fetal ECG Extraction / *R. Sameni, C. Jutten, M.B. Shamsollahi* // Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. – August 2006. – Vancouver, BC. – P. 656-661. **24.** *Behar J.* A Bayesian Filtering Framework for Accurate Extracting of the Non-Invasive FECG Morphology / *J. Behar, F. Andreotti, J. Oster, G. D. Clifford* // Proceedings of the Computing in Cardiology. – September 7-10.– Cambridge, MA, 2014. – P. 53-56.

References:

1. Minino, A.M., Heron, M.P., Murphy, S.L. and Kochanek, K.D. (2007), "Deaths: Final data for 2004", *National Vital Statistics Reports*, Vol. 55, No. 19, 120 p.
2. Wladimiro, J. and Pilu, G. (1996), *Ultrasound and the Fetal Heart*, Parthenon Publishing, Carnforth, 121 p.

3. Rabotti, C. (2010), *Characterization of uterine activity by electrohysterography: Ph.D. thesis*, Technische University Eindhoven, Eindhoven, 145 p.
4. Peters, M., Crowe, J., Pieri, J. F. et al. (2001), "Monitoring the fetal heart non-invasively: a review of methods", *Journal of Perinatal Medicine*, Vol. 29, pp. 408-416.
5. Van Geijn, H.P. (1996), "Developments in CTG analysis", *Baillière's Clinical Obstetrics and Gynaecology*, Vol. 10, No. 2, pp. 185-209.
6. Kovacs, F., Torok, M. and Habermajer, I. (2000), "A rule-based phonocardiographic method for long-term fetal heart rate monitoring", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 124-130.
7. Brake, H. J. M., Rijpma, A. P., Stinstra, J. G. et al. (2002), "Fetal magnetocardiography: clinical relevance and feasibility", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 368, pp. 10-17.
8. Chourasia, V.S. and Tiwari, A.K. (2008), "A Review and Comparative Analysis of Recent Advancements in Fetal Monitoring Techniques", *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, Vol. 36, No. 5-6, pp. 335-373.
9. Hayes-Gill, B., James, D., Crowe, J. and Pieri, J.-F. (2012), *Apparatus and method for detecting a fetal heart rate*, Patent USA, No. 20120150053.
10. Clifford, G., Sameni, R., Ward, J., Robinson, J. and Wolfberg, A.J. (2011), "Clinically accurate fetal ECG parameters acquired from maternal abdominal sensors", *American Journal of Obstetrics & Gynecology*, Vol. 205, No. 1, pp. 1-47.
11. "MindChild receives FDA pre-market clearance for MERIDIAN non-invasive fetal heart monitor", available at: <http://www.biospace.com/News/mindchild-medical-inc-files-fda-application-for/248451>
12. Larks, S.D. (1962), "Present status of fetal electrocardiography", *IRE Transactions on Bio-Medical Electronics*, Vol. 9, No. 3, pp. 176-180.
13. Euliano, T.Y., Nguyen, M. T., Darmanjian, S. et al. (2013), "Monitoring uterine activity during labor: a comparison of 3 methods", *American Journal of Obstetrics & Gynecology*, Vol. 208, No. 1, pp. 61-66.
14. Rabotti, C., Mischi, M., van Laar, J.O., Oei, G.S. and Bergmans, J.W. (2008), "Estimation of internal uterine pressure by joint amplitude and frequency analysis of electrohysterographic signals", *Physiological Measurement*, Vol. 29, No. 7, pp. 829-841.
15. Reinhard, J., Hayes-Gill, B. R., Schiermeier, S. et al. (2011), "Uterine activity monitoring during labour—a multi-centre, blinded two-way trial of external tocodynamometry against electrohysterography", *Zeitschrift für Geburtshilfe und Neonatologie*, Vol. 215, No. 5, pp. 199–204.
16. Vinken, M.P., Rabotti, C., Mischi, M. and Oei, G.S. (2009), "Accuracy of frequency-related parameters of the electrohysterogram for predicting preterm delivery: a review of the literature", *Obstetrical and Gynecological Survey*, Vol. 64, No. 8, pp. 529–541.
17. De Lau, H., Rabotti, C., Bijloo, R. et al. (2013), "Automated conduction velocity analysis in the electrohysterogram for prediction of imminent delivery: a preliminary study", *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Vol. 2013. – 7 p.
18. Malmivuo J. and Plonsey, R. (1995), *Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*, Oxford University Press, New York, 600 p.
19. Zaderykhin O. and Shulgin, V. (2010) "Blind Signal Separation Using Prior Information", *Proceedings of the Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science"*, Lviv-Slavskie, Ukraine, pp. 48.
20. Zaderykhin O., Shulgin, V. and Tokarev, A. (2011), "Blind signal separation of fetal ECG using prior information", *Proceedings of the International Congress on Electrophysiology*, Lund, Sweden, Journal of Electrophysiology, Vol. 44, pp. e37.
21. Shulgin V. and Shepel, O. (2014), "Computer Diagnostic System for Fetal Monitoring During Pregnancy", *Proceedings of the International Conference TCSET'2014 "Modern*

problems of radio engineering, telecommunications, and computer science", February 25. – March 1, 2014, Lviv-Slavskie, Ukraine, pp. 709-711.

22. Sameni R., Jutten, C. and Shamsollahi, M.B. (2010), "A Deflation Procedure for Subspace Decomposition", *IEEE Transactions On Signal Processing*, Vol. 58, No. 4, pp. 236.

23. Sameni R., Jutten, C. and Shamsollahi, M.B. (2006), "What ICA Provides for ECG Processing: Application to Noninvasive Fetal ECG Extraction", *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, Vancouver, BC*, pp. 656-661.

24. Behar, J., Andreotti, F., Oster, J.A. and Clifford, G.D. (2014), "Bayesian Filtering Framework for Accurate Extracting of the Non-Invasive FECG Morphology", *Proceedings of the Computing in Cardiology, September 7-10, 2014, Cambridge, MA*, pp. 53-56.

Поступила (received) 10.04.2016

Статью представил д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой компьютерных технологий и математического моделирования медицинского факультета Харьковского Национального университета им. В.Н. Каразина Мартыненко А.В.

Shulgin Vyacheslav, PhD, Professor

National Aerospace University named after N.Y. Zhukovsky "KhAI"

Str. Chkalova, 17, Kharkiv, Ukraine, 61070

Tel.: (057) 719-91-88, e-mail: vyacheslav.shulgin@gmail.com

Antonchyk Olga, Postgraduate Student

National Aerospace University named after N.Y. Zhukovsky "KhAI"

Str. Chkalova, 17, Kharkiv, Ukraine, 61070

Tel.: (066)156-05-27, e-mail: antonchyk.olga@gmail.com

УДК 616.12-073.97

Система діагностики стану плода та матері в ході вагітності
/ Шульгін В.І., Антончик О.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та
моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 170 – 183.

Розглядається нова технологія здійснення моніторингу стану матері та плода під час вагітності, яка базується на обробці електричних сигналів, що реєструються на поверхні тіла вагітної жінки в абдомінальній області (технологія абдомінального моніторингу). Показано алгоритми обробки багатоканального абдомінального сигналу для виявлення та вимірювання параметрів ЕКГ плода та активності матки. Запропоновано загальну структурну схему, що об'єднує всі ці алгоритми в систему. Іл.: 3. Бібліогр.: 24 назв.

Ключові слова: абдомінальний моніторинг, ЕКГ плода, активність матки, електричні сигнали.

УДК 616.12-073.97

Система диагностики состояния плода и матери в ходе беременности
/ Шульгин В.И., Антончик О.Н. // Весник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и
моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 170 – 183.

Рассматривается новая технология осуществления мониторинга матери и плода в ходе беременности, основанная на обработке электрических сигналов, регистрируемых на поверхности тела беременной женщины в абдоминальной области (технология абдоминального мониторинга). Показаны алгоритмы обработки многоканального абдоминального сигнала для выделения и измерения параметров ЭКГ плода и маточной активности. Предложена общая структурная схема, объединяющая все эти алгоритмы в систему. Ил.: 3. Библиогр.: 24 назв.

Ключевые слова: абдоминальный мониторинг, ЭКГ плода, маточная активность, электрические сигналы.

UDC 616.12-073.97

System of diagnosis fetal condition and the mother during pregnancy
/ Shulgin V.I., Antonchyk O.N. // Herald of the National Technical University
"KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI".
– 2016. – № 21 (1193). – P. 170 – 183.

New non-ultrasound technology of mother and fetus state monitoring during pregnancy (technology of abdominal monitoring) is considered. It is based on the processing of electrical signals recorded on the abdomen of a pregnant woman. Algorithms of multichannel abdominal signal processing for fetal ECG and uterine activity detection and characterization are presented. An overall block diagram uniting all these algorithms in one system is proposed. Figs.: 3. Refs.: 24 titles.

Keywords: abdominal monitoring, fetal ECG, uterine activity, electrical signals.

O.М. ШУШУРА, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Покровськ

(Красноармійськ),

A.Ю. ТІТОВА, асп., ДонНТУ, Покровськ (Красноармійськ)

РОЗРОБКА МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ТЕРМОГРАМ МОЛОЧНИХ ЗАЛОЗ ЖІНОК НА ЗАСАДАХ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Запропоновано новий підхід до аналізу характеристик термограм молочних залоз (МЗ) жінок під час діагностики онкологічних захворювань. Формалізовані вхідні та вихідні лінгвістичні змінні моделі аналізу кількісних та візуальних характеристик термограм МЗ на засадах нечіткої логіки, сформована її база знань та обрано алгоритм нечіткого виводу, перевірена адекватність моделі. Іл.: 4. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: термограма молочних залоз, онкологічні захворювання, нечітка логіка.

Постановка проблеми. Створення засобів діагностики онкологічних захворювань молочних залоз (МЗ) у жінок є важливою науково-технічною задачею. Одним з напрямів розв'язку цієї задачі є розробка інформаційних технологій для проведення аналізу термограм МЗ [1]. У загальному випадку термограма – це температурна карта ділянки тіла або всього тіла, представлена у вигляді зображення. Об'єктом дослідження у даній роботі є процес аналізу термограм МЗ жінок з метою постановки попереднього діагнозу. Для організації масового скринінгу пацієнтів актуальною проблемою є автоматизація аналізу кількісних та візуальних характеристик термограм МЗ з метою визначення ознак захворювань.

Аналіз літератури. Сучасні системи діагностики захворювань МЗ на основі термографії працюють з використанням знань експертів, ґрунтуються на розрахунку кількісних показників та оцінці візуальних характеристик термограм [2]. До кількісних оцінок відносять пошук середньої температури МЗ [2, 3]; мінімального та максимального значення температури МЗ [2, 3]; коефіцієнту асиметрії температурного розподілу кожної МЗ та коефіцієнту ексцесу кожної МЗ [2]; розрахунок залежності щільності мікросудин та їх підвищеної температури при захворюванні МЗ [4]. Проводять мультифрактальний аналіз на основі спектра сингулярностей, розрахунок показника Гельдера та вейвлет аналіз на основі метода максимумів модулів вейвлет-перетворювань [5]. До візуальних характеристик слід віднести кореляцію між щільністю мікросудин та градієнтом температури на ділянці пухлині [4]; виділення меж аномальних зон та методи для виділення областей інтересу [6]. Крім того, в [7] запропоновані підходи до створення 4D тепловізійної системи для медичного використання. Під час аналізу термограм розраховують

© О.М. Шушура, А.Ю. Тітова, 2016

статистичні показники, асиметричні діагностичні ознаки, виділяють граници зон гіпертермії, а експерт робить висновок, яке саме захворювання відповідає цим даним.

Загальним недоліком розглянутих підходів є те, що їх використання потребує у значній мірі участі експертів. Це збільшує час на проведення аналізу термограм та підвищує його вартість. Можливим напрямком подолання зазначеного недоліку є розробка моделі аналізу термограм МЗ на засадах нечіткої логіки, яка широко застосовується у задачах моделювання інтелектуальної діяльності людини [8].

Мета дослідження – розробка моделі аналізу кількісних та візуальних характеристик термограм МЗ на засадах нечіткою логіки для створення можливостей підвищення автоматизації визначення ознак захворювань.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- формалізувати вхідні та вихідні змінні моделі;
- визначити функції належності лінгвістичних змінних;
- сформувати нечітку базу знань;
- обрати алгоритм нечіткого логічного виводу;
- провести дослідження адекватності моделі.

Матеріали дослідження. Вихідними даними для постановки попереднього діагнозу є: відомості про стан пацієнта, термограма (рис. 1), набір температурних показників МЗ, результати розрахунку кількісних та візуальних характеристик термограм [9, 10], такі як: середня різниця температур, максимальна локальна асиметрія, площа ділянки гіпертермії.

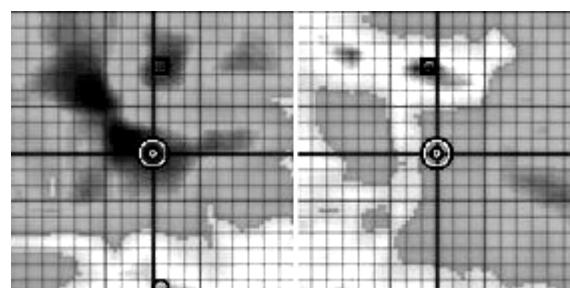


Рис. 1. Термограми з патологією в лівій МЗ

Для аналізу термограми необхідно розробити нечітку модель, яка представляє собою функціональну залежність виду:

$$f : \overline{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow Y, \quad (1)$$

де \bar{X} – вектор вхідних лінгвістичних змінних, які містять діагностичні ознаки захворювань МЗ.

Спрощений опис лінгвістичних змінних вектору \bar{X} наведено далі:

x_1 – біль в МЗ, терми якої: "немає", "слабка", "рідко", "локалізована", "періодична", "сильна", "дуже сильна";

x_2 – температура тіла пацієнта з термами: "норма", "підвищена", "висока";

x_3 – зміни шкіри МЗ, терми якої: "відсутня", "локальне почервоніння", "почервоніння", "велике почервоніння", "почервоніння та пущення";

x_4 – виділення з сосків МЗ, де терми: "нормального характеру", "зеленуваті", "кров'яні", "жовті";

x_5 – форма новоутворення з термами: "не пальпується", "вузлова", "неправильна", "гладка кулька", "значно неправильна", "майданчик";

x_6 – середня різниця температур МЗ з термами: "в межах норми" (MN – на рис. 2.), "ледь вище норми" (LVN), "вище норми" (VN), "дуже вище норми" (DVN), "перевищення норми" (PN), "велике перевищення норми" (VPN);

x_7 – різниця температур симетричних позицій, терми котрої: "граничні" (G – на рис. 3.), "ледь вище граничних" (LVG), "вище граничних" (VG), "дуже вище граничних" (DVG), "перевищення граничних" (PG), "велике перевищення граничних" (VPG);

x_8 – максимальне локальне перевищення температури правої МЗ, де терми: "нормальне", "незначне", "незначно більше", "більше", "значно більше";

x_9 – максимальне локальне перевищення температури лівої МЗ з термами: "нормальне", "незначне", "незначно більше", "більше", "значно більше";

x_{10} – максимальна локальна асиметрія, її терми: "не зазначена", "дуже маленька", "маленька", "середня", "велика", "дуже велика";

x_{11} – площа гіпертермії, де терми: "межова", "більше межової", "більша", "найбільша", "менш максимальна", "максимальна";

x_{12} – колір гіпертермії з термами: "зелений", "жовтий", "помаранчевий", "червоний";

Y – вихідна змінна, значення якої відповідає певному захворюванню МЗ.

Вихідна лінгвістична змінна Y – попередній діагноз, що містить терми: "Нормотермограма", "Вузлова форма раку", "Дифузна форма раку", "Киста", "Мастопатія", "рак Паджета", "Мастиподібна форма раку", "Мастит".

Функції належності термів обрано на основі метода комісії та статистичної обробки експертних даних. У якості прикладу на рис. 2, 3 наведені функції належності термів змінних: x_6 – середньої різниці температур МЗ та x_7 – різниці температур симетричних позицій, де по осі X – значення інтервалів відповідних термів, по осі Y – значення функції належності.

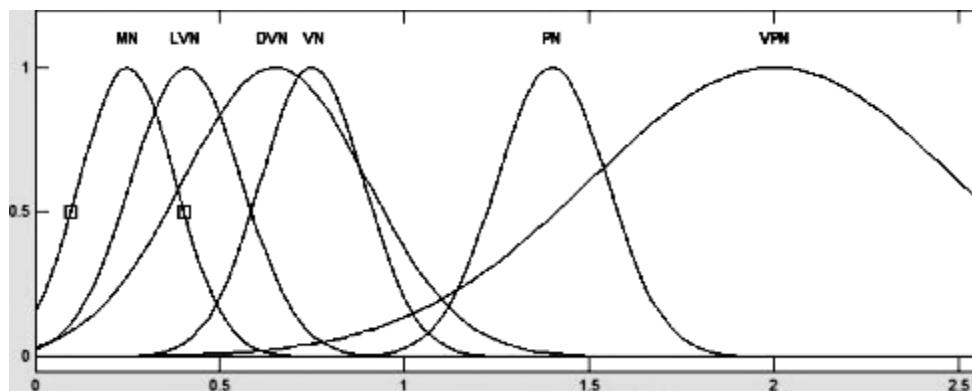


Рис. 2. Функції належності термів змінної x_6

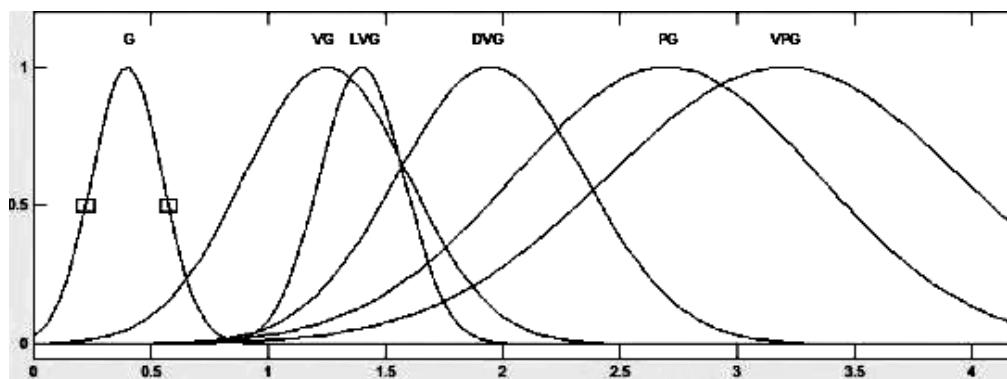


Рис. 3. Функції належності термів змінної x_7

На основі формалізованих лінгвістичних змінних сформована нечітка база знань у вигляді системи нечітких продукцій. У якості прикладу деякі правила наведені далі:

ЯКЩО $x_1 = \text{"немає"} \text{ I } x_2 = \text{"норма"} \text{ I } x_3 = \text{"відсутня"} \text{ I } x_4 = \text{"нормального характеру"} \text{ I } x_5 = \text{"не пальпується"} \text{ I } x_6 = \text{"в межах норми"} \text{ I } x_7 = \text{"граничні"} \text{ I } x_8 = \text{"нормальне"} \text{ I } x_9 = \text{"нормальне"} \text{ I } x_{10} = \text{"не зазначена"} \text{ I } x_{11} = \text{"межова"} \text{ I } x_{12} = \text{"зелений"} \text{ ТО } y = \text{"Нормотермограма"};$;

ЯКЩО $x_1 = \text{"слабка"} \text{ I } x_2 = \text{"норма"} \text{ I } x_3 = \text{"відсутня"} \text{ I } x_4 = \text{"зеленуваті"} \text{ I } x_5 = \text{"вузлова"} \text{ I } x_6 = \text{"перевищення норми"} \text{ I } x_7 =$

"перевищення граничних" I x_8 = "значно більше" I x_9 = "значно більше" I x_{10} = "велика" I x_{11} = "найбільша" I x_{12} = "жовтий" ТО y = "Вузлова форма раку";

ЯКЩО x_1 = "рідко" I x_2 = "висока" I x_3 = "локальне почервоніння" I x_4 = "нормального характеру" I x_5 = "неправильна" I x_6 = "велике перевищення норми" I x_7 = "велике перевищення граничних" I x_8 = "незначне" I x_9 = "більше" I x_{10} = "дуже велика" I x_{11} = "максимальна" I x_{12} = "жовтий" ТО y = "Дифузна форма";

ЯКЩО x_1 = "сильна" I x_2 = "норма" x_3 = "почервоніння" I x_4 = "кров'яні" I x_5 = "майданчик" I x_6 = "дуже вище норми" I x_7 = "вище граничних" I x_8 = "нормальне" I x_9 = "незначне" I x_{10} = "середня" I x_{11} = "більше межової" I x_{12} = "жовтий" ТО y = "рак Паджета";

ЯКЩО x_1 = "дуже сильна" I x_2 = "висока" I x_3 = "почервоніння" I x_4 = "зеленуваті" I x_5 = "вузлова" I x_6 = "ледь вище норми" I x_7 = "ледь вище граничних" I x_8 = "незначно більше" I x_9 = "незначно більше" I x_{10} = "маленька" I x_{11} = "більша" I x_{12} = "жовтий" ТО y = "Мастит".

Нечіткий логічний вивід, що здійснюється на наведеній базі правил, містить етапи:

- розрахунок значень функцій належності термів, що входять в антецеденти правил;
- обчислення на основі нечіткої логічної кон'юнкції значень антецедентів правил;
- розрахунок значень функцій належності термів вихідної змінної як нечіткої логічної диз'юнкції антецедентів правил, у яких терм є в консекventні.

В нечіткій моделі використано метод логічної кон'юнкції за мінімальним значенням в умовах нечітких правил, та метод логічної диз'юнкції за максимальним значенням.

Результатом нечіткого виводу є множина термів та розрахованих значень їх функцій належності. У якості основного попереднього діагнозу обирається терм з максимальним значенням функції належності.

Для перевірки адекватності моделі здійснювалося порівняння результатів моделювання з висновками експерта по 52 термограмам.

З метою чисельної оцінки адекватності моделі в базі знань використані константи, що відповідають термам лінгвістичної змінної, а саме $y = [0 - \text{Нормотермограма}; 0.1 - \text{Вузлова форма раку}; 0.2 - \text{Дифузна форма раку}; 0.4 - \text{Кіста}; 0.5 - \text{Мастопатія}; 0.6 - \text{рак Паджета}; 0.7 - \text{Мастиподібна форма раку}; 0.9 - \text{Мастит}]$. Потім був проведений нечіткий логічний вивід за алгоритмом Сугено з зазначеною вище реалізацією нечіткої логічної кон'юнкції та диз'юнкції, для дефазифікації застосовано метод зваженого середнього. Отримані результати зображені на рис. 4.

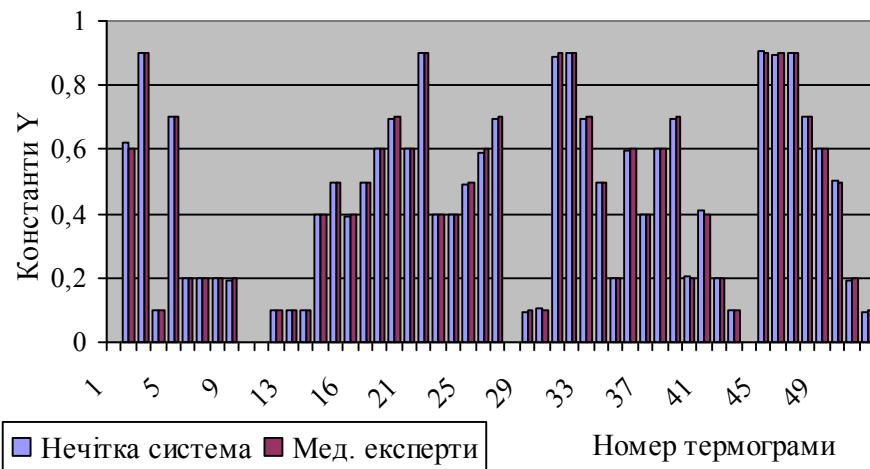


Рис. 4. Порівняння роботи нечіткої моделі та висновків мед. експертів

Для оцінки адекватності моделі використано критерій:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_i - me_i)^2}, \quad (2)$$

де y_i – значення вихідного результату нечіткої системи для даної термограми; me_i – значення висновку медичного експерта для даної термограми; l – кількість термограм, що обираються для аналізу.

В результаті дослідження 52 термограм значення критерія становило 0,000018, що свідчить про адекватність моделі.

Висновки. В даному дослідженні формалізовані вхідні та вихідні лінгвістичні змінні моделі аналізу кількісних та візуальних характеристик термограм МЗ на засадах нечіткою логіки, сформована її база знань та обрано алгоритм нечіткого виводу. Результати перевірки адекватності моделі свідчать про те, що вона може бути використана при створенні інформаційних технологій для проведення масового скринінгу населення на основі термограм з метою своєчасного виявлення захворювань МЗ на ранніх стадіях та збільшення ефективності діагностування та лікування в цілому.

Список літератури: 1. Титова А.Ю. Методи сегментації термограм під час діагностики онкологічних захворювань молочної залози / А.Ю. Титова, О.М. Шушура // Наукові праці ДонНТУ. – Красноармійськ, 2015. – № 1. – С. 89-96. 2. Приходченко В.В. Можливості контактної цифрової термографії у ранній доклінічній діагностиці раку молочної залози / В.В. Приходченко // ОНКОЛОГІЯ. – 2011. – № 2 – С. 125-129. 3. Kolaric D. Thermography – a feasible method for screening breast cancer / D. Kolaric // Coll. Antropol, 2013. – № 2. – P. 583-588. 4. Toshiro Y. Relationship between microvessel

density and thermographic hot areas in cancer / Y. Toshiro // *Surgery Today*, 2003. – № 33. – Р. 243-248. **5. Герасімова Є.І.** Мультифрактальний аналіз динаміки поверхневої температури молочних залоз і його використання для діагностики раку молочної залози: автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 03.01.02 – Біофізика / Герасімова Євгенія Ігорівна. – 2014. – 19 с. **6. Бехтір О.В.** Підвищення візуальної інформативності термограм у оптоелектронних системах тепловізорної медичної діагностики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.20 – оптоелектронні системи / Бехтір Олена Володимирівна. – К., 2006. – 21 с. **7. Skala K.** 4D thermal imaging system for medical applications / K. Skala // *Periodicum biologorum*. – 2011. – № 4. – Р. 407-416. **8. Штобба С.Д.** Введення в теорію нечітких множин і нечітку логіку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>. – Дата доступу: квітень 2016. – Заголовок з екрану. **9. Тимова А. Ю.** Апаратні та програмні складові первинної діагностики онкологічних захворювань молочної залози на основі термографії / A.I.O. Тимова, O.M Шушура // Збірка праць V Міжнародної міжвузівської школи-семінару "Методи і засоби діагностики в техніці – 2015". – Івано-Франковськ, 2015. – С. 98-101. **10. Titova A.Yu.** Fuzzy model thermal image analysis for detection breast cancer in women's / A.Yu. Titova // *AIST-2016* – Sumy, 2016. – Р. 83-85.

References:

1. Titova, A.Yu., Shushura, A.N. (2015), "Segmentation methods of thermograms in the breast cancer diagnosis", *Scientific works of DonNTU*, No. 1, pp. 89 – 96.
2. Prikhodchenko V.V. (2011), "Potentialities of contact digital thermography in early preclinical diagnostics of breast tumor", *ONCOLOGY*, No. 2, pp. 125 – 129.
3. Kolaric, D. (2013), "Thermography – a feasible method for screening breast cancer", *Coll Antropol*, No. 2, pp. 583 – 588.
4. Toshiro, Y. (2003), "Relationship between microvessel density and thermographic hot areas in cancer", *Surgery Today*, No. 33, pp. 243 – 248.
5. Gerasimova, E.I. (2014), *Multifractal analysis of the dynamics surface temperature of the breast and use for the diagnosis of breast cancer*, Author's thesis, Perm, 19 p.
6. Bekhtir, O.V. (2006), *Increasing of the visual informativeness for thermograms in optoelectronic systems by thermal-vision medical diagnostics*, Author's thesis, Kiev, 21 p.
7. Skala, K., (2011), "4D thermal imaging system for medical applications", *Periodicum biologorum*, No. 4, pp. 407 – 416.
8. Shtovba, S.D. (2001), "Introduction to Theory and fuzzy multitude fuzzy logic" available at: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (Accessed 4 April 2016).
9. Titova, A.Yu., Shushura, A.N. (2015), "Hardware and program components of primary diagnosis oncological breast diseases on the basis of the thermal visualization", *Proceedings of the V International Interuniversity school-seminar "Methods and diagnostic tools in technology – 2015"*, Ivano-Frankivsk, Ukraine, pp. 98 – 101.
10. Titova, A.Yu. (2016), "Fuzzy model thermal image analysis for detection breast cancer in women's", *AIST-2016, May, 2016*, Sumy, Ukraine, pp. 83 – 85.

Надійшла (received) 12.05.2016

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

Shushura Oleksiy Mykolayovych, Cand. Sci. Tech.

Donetsk National Technical University

Square Shybankova, 2, Krasnoarmiysk, Donetsk region, Ukraine, 85300

Tel.: (050) 470-15-67, e-mail: leshu@i.ua

ORCID ID: 0000-0003-3200-720X

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

УДК 004.896

Розробка моделі аналізу термограм молочних залоз жінок на засадах нечіткої логіки / Шушура О.М., Тітова А.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 184 – 192.

Запропоновано новий підхід до аналізу характеристик термограм молочних залоз жінок під час діагностики онкологічних захворювань. Формалізовані вхідні та вихідні лінгвістичні змінні моделі аналізу кількісних та візуальних характеристик термограм МЗ на засадах нечіткої логіки, сформована її база знань та обрано алгоритм нечіткого виводу, перевірена адекватність моделі. Іл.: 4. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: термограма молочних залоз, онкологічні захворювання, нечітка логіка.

УДК 004.896

Разработка модели анализа термограмм молочных желез женщин на основе нечеткой логики / Шушура А.Н., Титова А.Ю. // Весник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 21 (1193). – С. 184 – 192.

Предложен новый подход к анализу характеристик термограмм молочных желез женщин во время диагностики онкологических заболеваний. Формализованы входные и выходные лингвистические переменные модели анализа количественных и визуальных характеристик термограмм МЗ на основе нечеткой логики, сформирована ее база знаний и выбран алгоритм нечеткого вывода, проверена адекватность модели. Ил.: 4. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: термограмма молочных желез, онкологические заболевания, нечеткая логика.

UDC 004.896

Development of model analysis of thermal images breast women based on fuzzy logic / Shushura A.N, Titova A.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – № 21 (1193). – P. 184 – 192.

A new approach to analyzing the characteristics of thermal image breasts of women in the diagnosis of cancer was proposed. Input and output linguistic variables of model analysis of quantitative and visual characteristics of thermal image breast based on fuzzy logic were formalized, fuzzy knowledge base was formed and fuzzy inference algorithm was selected, the adequacy of the model was tested. Figs.: 4. Refs.: 10 titles.

Keywords: thermal image breast, cancer, fuzzy logic.

ЗМІСТ

<i>Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах</i>	3
<i>Готра З.Ю., Кожухар О.Т., Кучмій Г.Л., Кремер І.П., Радзішевський Л.</i> Система неперервного інформаційного обміну між ПК та периферійним оптикоелектронним пристроєм	4
<i>Даниленко А.Ф., Дьяков А.Г., Олексюк В.Э.</i> Обеспечение стабильности измерений в установке ЯМР-спектрометра	11
<i>Дмитриева О.А.</i> О Построении параллельных разностных схем моделирования с вариацией шага в расчетном блоке	20
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В.</i> Дискретная нейронная сеть АРТ с использованием расстояния Хемминга	29
<i>Корсунов А.Р.</i> Технологія електромагнітної активізації тканинних структур організму	41
<i>Литвин В.В., Угрин Д.І.</i> Методика вирішення завдань пошуку оптимальних туристичних маршрутів алгоритмами наслідування мурашиної колонії	47
<i>Матюшенко Н.В., Федченко А.В., Шелихова И.Б.</i> Построение алгоритма определения интерференции в цилиндрических передачах Новикова с двумя линиями зацепления, нарезаемых методом обкатки	61
<i>Pavlenko V.D., Fomin O.O., Fedorova A.N., Dombrovskyi M.M.</i> Identification of human eye-motor system base on Volterra model	74
<i>Пасічник В.В., Шестакевич Т.В.</i> Модель процесу аналізу даних психофізіологічного діагностування	86
<i>Превисокова Н.В.</i> Аналіз ефективності методу кодування інформації на основі ортогонального перетворення Галуа	92
<i>Самигулина Г.А., Самигулина З.И.</i> Построение оптимальной иммунносетевой модели для компьютерного молекулярного дизайна сульфаниламидов на основе алгоритма random forest	102
<i>Семаньків М.В.</i> Оцінка статистичних характеристик систем випадкових чисел	109

<i>Семенов С.Г., Гавриленко С.Ю., Челак В.В.</i> Разработка шаблонов идентификации состояния компьютерных систем на основе BDS-тестирования	118
<i>Сокол Г.И., Юшкевич О.П., Хорищенко А.А., Ткачук В.С., Лапик А.И.</i> Моделирование механизмов промышленных и космических роботов в программной среде "1С. Математический конструктор"	128
<i>Сузdal' B.C., Епифанов Ю.М., Таировский И.И.</i> Синтез стабилизирующего управления процессами выращивания монокристаллов	135
<i>Сухоруков В.І., Сербіненко І.А., Бовт Ю.В., Забродіна Л.П.</i> Комп'ютерний аналіз змін структури нічного сну хворих на енцефалопатію під впливом геомагнітних бур	144
<i>Tikhonov V.I., Taher A., Tykhonova O.V.</i> Conveyor module resource scheduling in packet based communication channel	152
<i>Ширяева О.И., Денисова Т.Г.</i> Моделирование стохастического иммунного объекта формирования терапевтических доз лекарственных препаратов	162
<i>Шульгин В.И., Антончик О.Н.</i> Система диагностики состояния плода и матери в ходе беременности	170
<i>Шушура О.М., Титова А.Ю.</i> Розробка моделі аналізу термограм молочних залоз жінок на засадах нечіткої логіки	184

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

*Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 21 (1193)*

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЙ: 61002, Харків, вул Кірпічова, 21, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 19 – 16

Підп. до друку 27.05.2016 р. Формат 70x108 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. Кірпічова, 21

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Отпечатано в типографии ООО «Цифра Принт»
на цифровом комплексе Xerox DocuTech 6135.
Свидетельство о Государственной регистрации А01 № 432705 от
3.08.2009 г.
Адрес : г. Харьков, ул. Данилевского, 30. Телефон: (057) 7861860.