

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Серія: Інформатика та моделювання

№ 50 (1271) 2017

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2017

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – 161 с.

Державне видання

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

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

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

Координаційна рада:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакційна колегія серії:

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

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

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

наук, проф.; О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, доц.; П.О. Качанов, д-р техн.

наук, проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; Г.А. Кучук, д-р техн. наук,

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

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

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

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

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

(Polska).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 11 від 22.12.2017 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2017

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

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

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

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

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

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

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

6. University Libraries: **USA:** 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. **UK:** 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. **Canada:** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. **Australia:** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. **Sweden:** IBRIS – Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. **Netherlands:** Quality Open Access Market, University of Leiden. **Mexico:** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. **Other countries:** Universia (Spain), Babord+ (France), SLU (Sweden), Cerge EL (Czech Republic), BON (Portugal), AUT Library (New Zealand), Polska Bibliografia Naukowa (Poland), State National Technical Library (Ukraine), Scientific Library named by Govorov (Russia, St. Petersburg), Universiteits bibliotheek Gent (Belgium), E-Resources Subject Access (China).

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

Математические методы и модели

Э.И. ВЕЛИЕВ, д-р физ.-мат. наук, проректор, НТУ "ХПИ"

О СВЕРТКЕ РЯДОВ ШЛЕМИЛЬХА – НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Рассмотрены ряды Шлемильха (Schlomilch), которые применяются при решении различных задач дифракции волн, при расчете волноводов сложного сечения и т.д. Однако их вычисление весьма трудоемко. Поэтому предлагаются два новых представления рядов Шлемильха по функциям Бесселя, которые используют быстроходящиеся ряды по элементарным функциям. В частных случаях получены аналитические представления этих рядов. Также приводится новое представление для функций Бесселя. Табл.: 5. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: ряды Шлемильха; функции Бесселя; аналитические представления.

Постановка проблемы и анализ литературы. В статье рассматривается свёртка рядов Шлемильха (Schlomilch) следующего вида

$$S_k^\lambda = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha), \quad \lambda \geq 0, \quad (1)$$

$$V_{k+\lambda}^{p+\mu}(v) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^v} J_{k+\lambda}(n\alpha) J_{p+\mu}(n\alpha), \quad \lambda + \mu \geq 0, \quad (2)$$

где $J_{k+\lambda}(x)$ функция Бесселя, и $\alpha \in [0, \pi]$, λ, μ, v – вещественные параметры. Свёртка этих рядов, либо представления их через элементарные функции представляют большой интерес, поскольку они возникают в различных задачах дифракции волн. В целом, ряды (1) и (2) сходятся достаточно медленно, что усложняет их расчёты с заданной точностью и требует разработки новых представлений рядов Шлемильха с существенно меньшим объемом вычислений.

Особый случай (2) при $\mu = \lambda, v = 2\lambda + 1$ и $\lambda = 0$ был рассмотрен в работах [1 – 3] при исследовании рассеивания плоской волны цилиндрическим экраном. Для таких задач мы имеем $\alpha = \theta$, где θ – геометрический размер экрана. Различные типы рядов (1) и (2) возникают в проблемах, связанных с волноводами сложного сечения [4], в задачах излучения с плоскопараллельного волновода с фланцем [5]. Следует отметить, что только особые случаи рядов (1) и (2) при $k = p = 0, v = \lambda + \mu$, приводятся в справочнике [6]. Отдельные аспекты свертки ряда (1) также были рассмотрены в работах [12, 13].

Цель статьи – получение для этих рядов альтернативного представления в явном виде или в терминах более элементарных функций. Кроме того, получить новое представление для функций Бесселя, которое выглядит следующим образом:

$$\frac{J_{k+\lambda}(m\alpha)}{m^\lambda} = \frac{1}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha) \frac{\sin \alpha(m-n)}{m-n}, \quad \lambda > 0. \quad (3)$$

Представления рядов в аналитической форме. В этом разделе даётся альтернативные представления в аналитической форме для рядов (1), (2) и устанавливается справедливость соотношения (3).

Во-первых, покажем справедливость соотношения (3). Учитывая, что ряд в правой части равномерно сходится, то можно переписать его следующим образом:

$$\frac{1}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha) \frac{\sin \alpha(m-n)}{m-n} = \frac{\alpha}{2\pi} \int_{-1}^1 e^{i\alpha m \eta} \Phi_k(\eta, \alpha) d\eta, \quad (4)$$

где

$$\Phi_k(\eta, \alpha) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha) e^{-i\alpha m \eta}. \quad (5)$$

Принимая во внимание [7], имеет место

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_\nu(\epsilon x)}{x^\mu} \frac{\sin[\epsilon(x-y)]}{x-y} dx = \frac{J_\nu(\epsilon y)}{y^\mu} \quad (6)$$

для $0 \leq \mu \leq \nu$, $\nu = 0, 1, 2, \dots$, ϵ – реальный параметр. Теперь предположим, что (6) действителен для любого μ и ν так, что $0 < \mu < \nu$. Затем, заменяя

$$\nu = k + \lambda, \quad \mu = \lambda, \quad y = n \quad (7)$$

и подставляя (6) в (5), получим

$$\Phi_k(\eta, \alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_{k+\lambda}(\alpha x)}{x^\lambda} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i\alpha m \eta} \frac{\sin \alpha(x-n)}{x-n} dx. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что ряд в (8) может быть представлен как

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i\alpha m \eta} \frac{\sin \alpha(x-n)}{x-n} = \pi e^{-i\alpha x \eta}, \quad |\eta| < 1, \quad (9)$$

тогда соотношение (8) приобретает вид:

$$\Phi_k(\eta, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_{k+\lambda}(\alpha x)}{x^\lambda} e^{-i\alpha x \eta} dx. \quad (10)$$

Теперь, подставляя (10) в (4) и интегрируя результат по переменной η в пределах $(-1, 1)$, приходим

$$\frac{1}{n} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha) \frac{\sin \alpha(m-n)}{m-n} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_{k+\lambda}(x\alpha)}{x^\lambda} \frac{\sin \alpha(x-m)}{x-m} dx. \quad (11)$$

Наконец, сопоставляя (6) и (11) приходим к выводу, что имеет место представление (3). Следует отметить, что соотношение (3) в точности аналогично интегральному представлению (6). Равенство (3) было проверено численно (см. табл. 1). что показывает полную справедливость данного соотношения.

Таблица 1

Значения усеченного ряда (3) при различных значениях параметра усечения

		$\frac{1}{\pi} \sum_{n=-NN}^{NN} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha) \frac{\sin \alpha(m-n)}{m-n}$				
$\alpha = \pi/2 = 1.570796$	$\frac{J_{k+\lambda}(m\alpha)}{m^\lambda}$	NN=5	NN=10	NN=50	NN=100	NN=500
$k=1, \lambda=1, m=1$	2.497016E-01	2.400811E-01	2.469212E-01	2.494357E-01	2.496069E-01	2.49693E-01
$k=3, \lambda=1, m=1$	1.399604E-02	2.573342E-02	1.721381E-02	1.427329E-02	1.409291E-02	1.4005E-02
$k=5, \lambda=1, m=1$	2.983476E-04	-8.549538E-03	-3.266610E-03	3.746473E-06	1.981240E-04	2.8971E-04
$k=1, \lambda=1, m=5$	-3.009402E-02	-5.012642E-02	-3.314727E-02	-3.03610E-02	-3.01888E-02	-3.0103E-02
$k=3, \lambda=1, m=5$	-1.389344E-02	1.079264E-02	-1.034994E-02	-1.36151E-02	-1.37965E-02	-1.388487E-02
$k=5, \lambda=1, m=5$	6.918731E-02	5.379513E-02	6.526445E-02	6.889150E-02	6.908698E-02	6.9178E-02

Свёртка ряда Шлемильха. Прежде чем заняться свёрткой ряда (1), рассмотрим следующий ряд

$$S_\lambda^k = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_{k+\lambda}(n\alpha). \quad (12)$$

Используя интегральное представление для функции Бесселя [8]

$$\frac{J_{k+\lambda}(n\alpha)}{(n\alpha)^\lambda} = \alpha_k^\lambda \int_{-1}^1 e^{in\alpha\eta} (1-\eta^2)^{\lambda-\frac{1}{2}} C_k^\lambda(\eta) d\eta, \quad (13)$$

где $\text{Re}(\lambda) > -0,5$, $C_k^\lambda(\eta)$ – полиномы Гегенбауэра и

$$\alpha_k^\lambda = \frac{(-i)^k}{2^\lambda} \frac{\Gamma(2\lambda)\Gamma(k+1)}{\Gamma(\lambda+\frac{1}{2})\Gamma(k+2\lambda)}, \quad (14)$$

где $\Gamma(x)$ является Гамма-функцией, соотношение (12) можно переписать как

$$S_k'^\lambda = \alpha^\lambda a_k^\lambda \int_{-1}^1 \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\alpha\eta} (1-\eta^2)^{\lambda-\frac{1}{2}} C_k^\lambda(\eta) d\eta. \quad (15)$$

В (15) был использован тот факт, что ряд в формуле (12) равномерно сходится. Если в (15) заменим сумму на

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\alpha\eta} = \frac{2\pi}{\alpha} \delta(\eta), \quad (16)$$

где $\delta(\eta)$ – дельта-функция Дирака, то получим следующую формулу

$$S_k'^\lambda = \alpha^\lambda a_k^\lambda \frac{2\pi}{\alpha} C_k^\lambda(0), \quad (17)$$

где для полиномов Гегенбауэра $C_k^\lambda(0)$ имеет место [9, стр. 777]

$$C_k^\lambda(0) = \begin{cases} 0, & k = 2m + 1, \\ (-1)^{\frac{k}{2}} \Gamma(\frac{k}{2} + \lambda) \\ \frac{\Gamma(\lambda)\Gamma(\frac{k}{2} + \lambda)}{2}, & k = 2m. \end{cases} \quad (18)$$

Теперь подставляя (18) в (17), и упрощая результат, получаем

$$S_k'^\lambda = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda-1} \frac{\left[1 + (-1)^k\right] \Gamma(\frac{k+1}{2})}{2\Gamma(\frac{k+1}{2} + \lambda)}. \quad (19)$$

Легко показать, что

$$S_k^{\lambda} = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda} \frac{\delta_{k,0}}{\Gamma(\lambda+1)} + [1 + (-1)^k] S_k^{\lambda}, \quad k \geq 0, \quad (20)$$

где $\delta_{k,0} = 1$, если $k = 0$ и $\delta_{k,0} = 0$, если $k \neq 0$. Используя (19) и (20), получаем

$$S_k^{\lambda} = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda-1} \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{2\Gamma\left(\frac{k+1}{2} + \lambda\right)} - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda} \frac{\delta_{k,0}}{2\Gamma(\lambda+1)}, \quad \lambda \geq 0. \quad (21)$$

При этом в отличие от ряда (1) соотношение (21) дает точный результат.

Итак, свёртка ряда Шлемильха (1) имеет вид (21). Необходимо подчеркнуть, что в справочной литературе [6, стр. 678] имеется только частный случай свёртки ряда (1) и (21), когда λ целое число. Очевидно, что представление (21) с точки зрения вычислительной эффективности превосходит ряд (1). В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчётов S_k^{λ} для различных значений λ , α и N , где N указывает количество членов в ряде (1). Значения S_k^{λ} в последнем столбце табл. 2, получены с помощью (21). Из табл. 2 видно значительное сокращение времени вычислений при использовании представления (21).

Некоторые частные случаи для ряда (1). Ниже приведены некоторые примеры особых случаев ряда (1).

Случай 1: $\lambda = 0$

$$S_k^0 = \sum_{n=1}^{\infty} J_k(n\alpha) = \frac{1}{\alpha} - \frac{\delta_{k,0}}{2}. \quad (22)$$

Случай 2: $\lambda = 1$

$$S_k^1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} J_{k+1}(n\alpha) = \frac{1}{k+1} - \frac{\alpha}{4} \delta_{k,0}. \quad (23)$$

Случай 3: $\lambda = 2$

$$S_k^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} J_{k+2}(n\alpha) = \frac{\alpha}{(k+3)(k+1)} - \frac{\alpha^2}{16} \delta_{k,0}. \quad (24)$$

Случай 4: $k = 0$

$$S_0^\lambda = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\lambda} J_\lambda(n\alpha) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda-1} \frac{\sqrt{\pi}}{2\Gamma(\lambda + \frac{1}{2})} - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^\lambda \frac{1}{2\Gamma(\lambda + 1)}. \quad (25)$$

Таблица 2
Сравнение формул (1) и (21) для различных значений λ и α по времени вычислений

k	Уравнение (1), $\lambda = 0.6, \alpha = 0.1$			Уравнение (21)
	N			Точно
	100	200	500	
0	3.140474	2.954448	2.969827	2.994830
1	1.926517	1.790110	1.864076	1.854727
2	1.276188	1.433947	1.429102	1.403439
3	1.018130	1.232059	1.152026	1.159204
4	1.037893	0.997560	0.975689	1.002457
5	1.079373	0.814917	0.894016	0.891696
Время расчёта (с)	1.20	3.57	15.71	0.000000
k	Уравнение (1), $\lambda = 0.9, \alpha = 0.2$			Уравнение (21)
	N			Точно.
	100	200	500	
0	1.180201	1.192931	1.191302	1.192006
1	0.645554	0.648681	0.655206	0.654486
2	0.459430	0.447669	0.449853	0.449091
3	0.355926	0.349517	0.343222	0.344467
4	0.274589	0.283094	0.279823	0.280682
5	0.222861	0.233091	0.238744	0.237563
Время расчёта (с)	1.70	5.49	20.10	0.001000

Если принят во внимание тот факт, что [9, стр. 257]

$$\frac{\Gamma(x+a)}{\Gamma(x+b)} \sim x^{a-b}, \quad (26)$$

где \sim – знак подобия,

тогда асимптотическое поведение S_k^λ при $k \rightarrow \infty$ будет иметь вид

$$S_{kk \rightarrow \infty}^\lambda \sim k^{-\lambda}. \quad (27)$$

Заметим, что альтернативное представление S_k^λ только при $\lambda = 0$ для (22) дано в работе Twersky [10].

Аналитическое представление для ряда (2). В этом разделе для свёртки ряда (2) предварительно рассмотрим ряд вида

$$\tilde{V}_{k+\lambda}^{P+\mu}(v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^v} J_{k+\lambda}(n\alpha) J_{p+\mu}(n\alpha), \quad (28)$$

где полагаем, что

$$v = \lambda + \mu. \quad (29)$$

Воспользуемся интегральным представлением для функций Бесселя [8, стр. 150], вида

$$J_{k+\lambda}(n\alpha) J_{p+\mu}(n\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} J_{k+p+\lambda+\mu}(2n\alpha \cos\theta) \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta d\theta, \quad (30)$$

где $\text{Re}(\lambda + \mu + k + p) > -1$. Теперь подставляя (29) и (30) в (28), получаем

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda + \mu) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_{k+p+\lambda+\mu}(2n\alpha \cos\theta)}{n^{\lambda+\mu}} \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta d\theta = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} S_{k+p}^{\lambda+\mu} \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta d\theta, \end{aligned} \quad (31)$$

где, как было показано ранее (см. (19)),

$$\begin{aligned} S_{k+p}^{\lambda+\mu} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^{\lambda+\mu}} J_{k+p+\lambda+\mu}(2n\alpha \cos\theta) = \\ &= [1 + (-1)^{k+p}] (\alpha \cos\theta)^{\lambda+\mu-1} \frac{\Gamma(\frac{k+p+1}{2})}{2\Gamma(\frac{k+p+1}{2} + \lambda + \mu)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Теперь, подставляя (32) в (31), получим следующее представление

$$\tilde{V}_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda + \mu) = \frac{\alpha^{\lambda+\mu-1} \Gamma(\frac{k+p+1}{2})}{\pi \Gamma(\frac{k+p+1}{2} + \lambda + \mu)} \times \quad (33)$$

$$\times [1 + (-1)^{k+p}] \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{\lambda+\mu-1}\theta \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta d\theta.$$

Интеграл в правой части (33) может быть записан ([11, стр. 372]) как

$$\int_0^{\pi} 2 \cos^{\lambda+\mu-1} \theta \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta d\theta =$$

$$= \frac{\pi \Gamma(\lambda+\mu)}{2^{\lambda+\mu} \Gamma(\frac{k-p+1}{2} + \lambda) \Gamma(\frac{p-k+1}{2} + \mu)}, \quad \lambda+\mu > 0. \quad (34)$$

Теперь, подставляя (34) в (33), получаем

$$\tilde{V}_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda+\mu) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu-1} \times$$

$$\times \frac{[1+(-1)^{k+p}] \Gamma(\lambda+\mu) \Gamma(\frac{k+p+1}{2})}{2 \Gamma(\frac{k+p+1}{2} + \lambda + \mu) \Gamma(\frac{k-p+1}{2} + \lambda) \Gamma(\frac{p-k+1}{2} + \mu)}, \quad \lambda+\mu > 0. \quad (35)$$

Легко показать, что

$$\tilde{V}_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda+\mu) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu} \frac{\delta_{k,0} \delta_{p,0}}{\Gamma(\lambda+1) \Gamma(\mu+1)} + [1+(-1)^{k+p}] V_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda+\mu). \quad (36)$$

Таким образом, имеем

$$V_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda+\mu) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu-1} \times$$

$$\times \frac{\Gamma(\lambda+\mu) \Gamma(\frac{k+p+1}{2})}{2 \Gamma(\frac{k+p+1}{2} + \lambda + \mu) \Gamma(\frac{k-p+1}{2} + \lambda) \Gamma(\frac{p-k+1}{2} + \mu)} -$$

$$- \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu} \frac{\delta_{k,0} \delta_{p,0}}{2 \Gamma(\lambda+1) \Gamma(\mu+1)}. \quad (37)$$

Только частный случай представления (37), когда $k = p = 0$ можно найти в справочнике [6, стр. 683]. Следует отметить, что полученные результаты (21) и (37) для свёртки рядов Шлемильха (1) и (2), являются аналогами известных, так называемых, разрывных интегралов Вебера – Шафхейтлина (Weber-Schafheitlin) для функции Бесселя [8, стр. 403; 6, стр. 211]. Как известно, эти интегралы имеют вид [6, стр. 174, 211]

$$\int_0^{\infty} \frac{J_{k+\lambda}(\alpha x)}{x^{\lambda}} dx = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda-1} \frac{\Gamma(\frac{k+1}{2})}{2 \Gamma(\frac{k+1}{2} + \lambda)}, \quad (38)$$

$$\int_0^\infty \frac{J_{k+\lambda}(\alpha x) J_{p+\mu}(\alpha x)}{x^{\lambda+\mu}} dx = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu-1} \times$$

$$\frac{\Gamma\left(\frac{k+p+1}{2}\right) \Gamma(\lambda+\mu)}{2\Gamma\left(\frac{k+p+1}{2} + \lambda + \mu\right) \Gamma\left(\frac{k-p+1}{2} + \lambda\right) \Gamma\left(\frac{p-k+1}{2} + \mu\right)}, \quad (39)$$

где $\operatorname{Re}(\lambda + \mu) > 0$. Сравнение представлений (21) и (37) с соответствующими представлениями (38) и (39) показывает, что полученные нами результаты свёртки рядов Шлемильха (1) и (2) являются аналогами интегральных представлений для функций Бесселя (38) и (39). Используя (26) и (27), можно показать, что имеет место следующие асимптотические пределы для $V_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda + \mu)$:

$$V_{k+\lambda}^{k+\mu}(\lambda + \mu)_{k \rightarrow \infty} \sim k^{-(\lambda+\mu)},$$

$$V_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda + \mu)_{k \rightarrow \infty} \sim k^{-2(\lambda+\mu)}, \quad (40)$$

$$V_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda + \mu)_{p \rightarrow \infty} \sim p^{-2(\lambda+\mu)}.$$

Ниже приведены некоторые важные частные случаи для $V_{k+\lambda}^{P+\mu}(\lambda + \mu)$.

Случай 1: $\lambda = 0, \mu = 1$

$$V_k^{P+1}(1) = \frac{2 \cos \pi\left(\frac{k-p}{2}\right)}{\pi(k+p+1)(p-k+1)} - \frac{\alpha}{4} \delta_{k,0} \delta_{p,0}. \quad (41)$$

Случай 2: $\lambda = 1, \mu = 0$

$$V_{k+1}^P(1) = \frac{2 \cos \pi\left(\frac{k-p}{2}\right)}{\pi(k+p+1)(k-p+1)} - \frac{\alpha}{4} \delta_{k,0} \delta_{p,0}. \quad (42)$$

Случай 3: $\lambda = \mu = 1$

$$V_{k+1}^{P+1}(2) = \frac{4\alpha \cos \pi\left(\frac{k-p}{2}\right)}{\pi(k+p+3)(k+p+1)[1-(k-p)^2]} - \frac{\alpha^2}{8} \delta_{k,0} \delta_{p,0}. \quad (43)$$

При выводе этих представлений был использован тот факт, что ([9, стр. 256])

$$\Gamma\left(\frac{1}{2} - x\right) \Gamma\left(\frac{1}{2} + x\right) = \frac{\pi}{\cos \pi x}. \quad (44)$$

Вычислительная эффективность полученных соотношений проверялось путём расчётов ряда (2) и представления (37). Эти результаты приведены в табл. 3 и 4 для различных значений параметров α , λ и μ . Время расчёта дано для всех матриц ($k^* p$), рассчитанных при различных N (N – количество членов в ряде). Как видно из табл. 3 и 4, уравнение (37) значительно уменьшает время вычисления. Следовательно, эффективность представления (37) не вызывает сомнений.

Представление ряда (2) через элементарные функции. В этом разделе для ряда (2) будет получено новое представление когда

$$v = \lambda + \mu + 1. \quad (45)$$

Далее будем предполагать, что в (2)

$$k + p = \text{четное и положительное}. \quad (46)$$

Условия (45) и (46) справедливы, и возникают в различных проблемах дифракции [1 – 5]. Альтернативный вывод для (2) при $\mu = \lambda$ и $v = 2\lambda + 1$ приводится в [4]. Ниже приводимый результат носит более общий характер. Далее снова будет использовано интегральное представление (30) для функции Бесселя, а также первое интегральное представление Сонина (Sonine) [8, стр. 373] для них вида

$$\begin{aligned} J_{k+p+\mu+\lambda}(2n\alpha \cos \theta) &= \\ &= \frac{(2n\alpha \cos \theta)^{\lambda+\mu}}{2^{\lambda+\mu-1} \Gamma(\lambda+\mu)} \int_0^{\pi} J_{k+p}(2n\alpha \cos \theta \sin \phi) \times \\ &\times \sin^{k+p+1} \phi \cos^{2\lambda+2\mu-1} \phi d\phi, \quad \text{Re}(\lambda+\mu) > 0. \end{aligned} \quad (47)$$

Как было отмечено выше, полагаем что $k + p = \text{чётно}$. Тогда примем во внимание следующее интегральное представление для $J_{k+p}(x)$ [8, стр. 21]

$$J_{k+p}(x) = \int_0^{\pi} \cos(x \sin \phi) \cos(k+p)\phi d\phi. \quad (48)$$

Таблиця 3

Сравнение формул (2) и (37) по времени расчетов для
 $\alpha = 0.1, \mu = 0.6, \lambda = 0.7$

		Уравнение (2) при $\alpha = 0.1, \mu = 0.6, \lambda = 0.7$						Время расчёта (с)	
		p							
	k	0	1	2	3	4	5		
N	100	0	0.379159	0.133901	0.026231	-0.008133	-0.008931	-0.001942	14.34
		1	0.116451	0.104794	0.056893	0.015904	-0.002970	-0.005622	
		2	0.015679	0.050277	0.052687	0.033597	0.012731	0.000286	
		3	-0.010599	0.010575	0.030207	0.033160	0.022858	0.009900	
		4	-0.007793	-0.004936	0.009551	0.020941	0.021904	0.015553	
		5	-0.000576	-0.005413	-0.001274	0.007906	0.014430	0.015198	
	200	0	0.382911	0.134441	0.022590	-0.010143	-0.006390	0.001885	42.85
		1	0.115922	0.108161	0.058211	0.013087	-0.005731	-0.004750	
		2	0.011772	0.050576	0.056688	0.034926	0.009471	-0.003386	
		3	-0.011711	0.007365	0.030579	0.036533	0.024243	0.007447	
		4	-0.004522	-0.006944	0.005781	0.021419	0.025903	0.017927	
		5	0.002923	-0.003667	-0.004412	0.004833	0.015959	0.019512	
	500	0	0.384707	0.134810	0.020837	-0.010841	-0.004825	0.003096	186.97
		1	0.115764	0.109794	0.058553	0.011516	-0.006467	-0.003423	
		2	0.009958	0.050401	0.058481	0.035437	0.007816	-0.004442	
3		-0.011906	0.005697	0.030587	0.038207	0.024659	0.005904		
4		-0.002770	-0.007202	0.003997	0.021344	0.027665	0.018582		
5		0.003709	-0.002091	-0.005022	0.003130	0.016135	0.021289		
		Уравнение (37) при $\alpha = 0.1, \mu = 0.6, \lambda = 0.7$							
	0	0.385447	0.134996	0.020100	-0.011005	-0.004102	0.003335	0.055	
	1	0.115711	0.110551	0.058694	0.010768	-0.006670	-0.002699		
	2	0.009213	0.050309	0.059224	0.035572	0.007084	-0.004653		
	3	-0.011837	0.004935	0.030490	0.038963	0.024818	0.005166		
	4	-0.002019	-0.007174	0.003247	0.021272	0.028410	0.018730		
	5	0.003720	-0.001328	-0.005005	0.002368	0.016055	0.022043		

Таблиця 4

Сравнение формул (2) и (37) для $\alpha = 0.2$, $\mu = 0.7$, $\lambda = 0.5$ по времени вычислений

Уравнение (2) при $\alpha=0.2, \mu=0.7, \lambda=0.5$								Время расчёта (с)	
p									
k	0	1	2	3	4	5			
N	100	0	0.571088	0.164204	0.005243	-0.022386	-0.005287	0.006767	21.53
		1	0.226266	0.176111	0.075591	0.005092	-0.014017	-0.005125	
		2	0.041172	0.102139	0.095424	0.047349	0.005277	-0.009345	
		3	-0.018259	0.024767	0.062824	0.062951	0.034231	0.005264	
		4	-0.012483	-0.010390	0.018282	0.044460	0.045520	0.026094	
		5	0.003180	-0.009417	-0.006039	0.014648	0.033321	0.034744	
	200	0	0.574070	0.163516	0.002177	-0.022326	-0.002222	0.007797	67.30
		1	0.227356	0.178782	0.074837	0.002263	-0.014046	-0.002305	
		2	0.038316	0.103126	0.098403	0.046972	0.002209	-0.010058	
		3	-0.019892	0.022277	0.064142	0.065719	0.033680	0.002291	
		4	-0.010072	-0.012024	0.015664	0.045563	0.048436	0.026021	
		5	0.005627	-0.007475	-0.008243	0.012241	0.034857	0.037717	
	500	0	0.575494	0.163087	0.000727	-0.022035	-0.000736	0.007750	234.34
		1	0.227861	0.180267	0.074424	0.000739	-0.013834	-0.000748	
		2	0.036919	0.103634	0.099831	0.046599	0.000733	-0.009928	
		3	-0.020519	0.020836	0.064681	0.067211	0.033339	0.000744	
		4	-0.008754	-0.012712	0.014303	0.046123	0.049871	0.025697	
		5	0.006460	-0.006147	-0.008995	0.010840	0.035424	0.039213	
Уравнение (37) при $\alpha=0.2, \mu=0.7, \lambda=0.5$									
	0	0.576217	0.163238	0.000000	-0.021823	0.000000	0.007578	0.055	
	1	0.228534	0.180998	0.074199	0.000000	-0.013640	0.000000		
	2	0.036200	0.103879	0.100555	0.046375	0.000000	-0.009743		
	3	-0.020776	0.020111	0.064924	0.067942	0.033125	0.000000		
	4	-0.008044	-0.012985	0.013588	0.046375	0.050595	0.025481		
	5	0.006752	-0.005435	-0.009275	0.010119	0.035673	0.039944		

Подставляя (48) в (47), а после (47) в (30), получим

$$\begin{aligned}
 & J_{k+\lambda}(n\alpha)J_{p+\mu}(n\alpha) = \\
 & = \frac{4}{\pi^2} \frac{(n\alpha)^{\lambda+\mu}}{\Gamma(\lambda+\mu)} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\pi} \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta \cos^{\lambda+\mu}\theta \times \\
 & \times \left\{ \sin^{k+p+1} \phi \cos^{2\lambda+2\mu-1} \phi \left[\begin{array}{l} \cos(2n\alpha \cos \theta \sin \phi \sin \psi) \\ \cos(k+p)\psi \end{array} \right] \right\} d\theta d\phi d\psi. \quad (49)
 \end{aligned}$$

Подставляя интегральное представление (49) в (2) при $\nu = \lambda + \mu + 1$, получим

$$\begin{aligned}
 & V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1) = \\
 & = \frac{4}{\pi^2} \frac{\alpha^{\lambda+\mu}}{\Gamma(\lambda+\mu)} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\pi} \cos(k+p+\lambda-\mu)\theta \cos^{\lambda+\mu}\theta \times \\
 & \times \{ \sin^{k+p+1} \phi \cos^{2\lambda+2\mu-1} \phi \cos(k+p)\psi \ln 2 \sin(\alpha \cos \theta \sin \phi \sin \psi) \} \times \\
 & \times d\theta d\phi d\psi. \quad (50)
 \end{aligned}$$

При выводе (50), был использован тот факт, что ([11, стр. 381])

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(2n\alpha \cos \theta \sin \phi \sin \psi) = -\ln 2 \sin(\alpha \cos \theta \sin \phi \sin \psi). \quad (51)$$

Используя представление для функции $\ln(2 \sin x)$ в виде ([11, стр. 46])

$$\ln(2 \sin x) = \ln 2x - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\zeta(2s)}{s} \left(\frac{x}{\pi}\right)^{2s}, \quad (52)$$

где $\zeta(2s)$ это Зета функция Римана (Riemann Zeta) функция [9, стр. 807], тогда $V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)$ может быть представлено следующим образом:

$$V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1) = Q_{kp}^{(1)} + Q_{kp}^{(2)}, \quad (53)$$

где

$$\begin{aligned}
 & Q_{kp}^{(1)} = -\frac{4}{\pi^2} \frac{\alpha^{\mu+\lambda}}{\Gamma(\lambda+\mu)} \times \\
 & \times [A_0^+ B_0^+ C_0^+ \ln(2\alpha) + C_0^+ B_0^+ A_0^- + C_0^+ A_0^+ B_0^- + A_0^+ B_0^+ C_0^-], \quad (54)
 \end{aligned}$$

$$Q_{kp}^{(2)} = \frac{4}{\pi^2} \frac{\alpha^{\lambda+\mu}}{\pi^2 \Gamma(\lambda+\mu)} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\zeta(2s)}{s} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{2s} A_{2s}^+ B_{2s}^+ C_{2s}^+ \quad (55)$$

с

$$A_s^\pm = \int_0^\pi \frac{1}{2} \{\ln \cos \theta\} \cos(k-p+\lambda-\mu)\theta \cos^{\lambda+\mu+s} \theta d\theta, \quad (56)$$

$$B_s^\pm = \int_0^\pi \frac{1}{2} \{\ln \sin \varphi\} \sin^{(s+k+p+1)} \varphi \cos^{2\lambda+2\mu-1} \varphi d\varphi, \quad (57)$$

$$C_s^\pm = \int_0^\pi \frac{1}{2} \{\ln \sin \psi\} \cos(k+p)\psi \sin^s \psi d\psi. \quad (58)$$

Интегралы в (56) – (58) являются табличными интегралами ([11]) и могут быть вычислены в аналитическом виде (см. приложение). Как результат, получаем

$$Q_{kp}^{(1)} = \frac{Q_{kp}^{\lambda\mu}(0)}{k+p} = \frac{\Gamma(\lambda+\mu+1)\Gamma\left(\frac{k+p}{2}\right)}{2\Gamma\left(\frac{k-p}{2}+\lambda+1\right)\Gamma\left(\frac{p-k}{2}+\mu+1\right)\Gamma\left(\frac{k+p}{2}+\lambda+\mu+1\right)} \cdot \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu} \quad (59)$$

При $k+p > 0$ имеем

$$Q_{kp}^{(2)} = \frac{1}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{2s} \frac{\zeta(2s)}{s} Q_{kp}^{\mu\lambda}(s) C_{2s}^+, \quad (60)$$

где

$$Q_{kp}^{\lambda\mu}(s) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\lambda+\mu} \times \frac{\Gamma(2s+\lambda+\mu+1)\Gamma\left(s+1+\frac{k+p}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k-p}{2}+\lambda+s+1\right)\Gamma\left(\frac{p-k}{2}+\mu+s+1\right)\Gamma\left(\frac{k+p}{2}+\lambda+\mu+s+1\right)}. \quad (61)$$

В табл. 5 приведены результаты вычислений уравнения (60) при различных значениях α .

Выражение для C_{2s}^+ представлено в приложении (А.3). Используя (26) и (44) можно получить следующие асимптотические пределы для $V_{k+\lambda}^{\mu+1}(\lambda + \mu + 1)$:

$$\begin{aligned}
 V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)_{k \rightarrow \infty} &\sim Q_{kk}^{(1)} \sim k^{-\lambda-\mu-1}, \\
 V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)_{k \rightarrow \infty} &\sim Q_{kp}^{(1)} \sim k^{-2(\lambda+\mu)-2}, \\
 V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)_{p \rightarrow \infty} &\sim Q_{kp}^{(1)} \sim p^{-2(\lambda+\mu)-2}.
 \end{aligned}
 \tag{62}$$

Таблица 5

Значения уравнения (60) при различных значениях α

Уравнение (60), при $\lambda = \mu = 1/2, \alpha = \pi/2$						
	p					
k	0	1	2	3	4	5
0	$1.75 \cdot 10^{-4}$	0	$2.14 \cdot 10^{-4}$	0	$-3.97 \cdot 10^{-6}$	0
1	0	$3.13 \cdot 10^{-4}$	0	$-9.04 \cdot 10^{-6}$	0	$2.4 \cdot 10^{-7}$
2	$2.14 \cdot 10^{-4}$	0	$1.17 \cdot 10^{-5}$	0	$4.47 \cdot 10^{-7}$	0
3	0	$-9.04 \cdot 10^{-6}$	0	$5.47 \cdot 10^{-7}$	0	$-2.38 \cdot 10^{-7}$
4	$3.97 \cdot 10^{-6}$	0	$4.47 \cdot 10^{-7}$	0	$2.81 \cdot 10^{-8}$	0
5	0	$2.4 \cdot 10^{-7}$	0	$2.38 \cdot 10^{-8}$	0	$1.53 \cdot 10^{-9}$
Уравнение (60), при $\lambda = \mu = 1/2, \alpha = \pi/10$						
0	$-6.5 \cdot 10^{-4}$	0	$2.7 \cdot 10^{-7}$	0	$-1.6 \cdot 10^{-8}$	0
1	0	$4.0 \cdot 10^{-7}$	0	$4.0 \cdot 10^{-10}$	0	$3.4 \cdot 10^{-13}$
2	$2.7 \cdot 10^{-7}$	0	$5.3 \cdot 10^{-10}$	0	$6.9 \cdot 10^{-13}$	0
3	0	$4.0 \cdot 10^{-10}$	0	$8.6 \cdot 10^{-13}$	0	$1.3 \cdot 10^{-15}$
4	$-1.6 \cdot 10^{-8}$	0	$6.9 \cdot 10^{-13}$	0	$-1.5 \cdot 10^{-15}$	0
5	0	$3.4 \cdot 10^{-13}$	0	$1.3 \cdot 10^{-13}$	0	$3.0 \cdot 10^{-18}$

Таким же образом, для $V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)$ при $k = p = 0, \lambda = \mu$ можно найти представление:

$$V_{\lambda}^{\mu} |_{\lambda=\mu} = V_{\lambda}^{\lambda}(2\lambda + 1) = Q_{00}^{(1)} + Q_{00}^{(2)}, \tag{63}$$

где

$$\begin{aligned}
 Q_{00}^{(1)} &= -\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2\lambda} \frac{1}{2\Gamma^2(\lambda + 1)} \times \\
 &\times \left\{ 2 \ln \alpha + \psi\left(\lambda + \frac{1}{2}\right) - \psi(\lambda + 1) + \psi(1) - \psi(2\lambda + 1) \right\},
 \end{aligned}
 \tag{64}$$

$$Q_{00}^{(2)} = \frac{1}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{2s} \frac{\zeta(2s)}{s} Q_{00}^{\lambda\lambda}(s) C_{2s}^+ \Big|_{k=p=0}. \quad (65)$$

$\psi(x)$ – это *psi* функция. Очень важно отметить, что, как показали численные расчёты, когда $\alpha \leq \frac{\pi}{2}$, то для $V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)$ имеет место

$$V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1) = Q_{kp}^{(1)} + O(10^{-4}). \quad (66)$$

Это означает, что величины $Q_{kp}^{(2)}$ имеют порядок $Q_{kp}^{(2)} = O(10^{-4})$. Таким образом, в этом случае можно сказать, что аналитическое представление для $V_{k+\lambda}^{p+\mu}(\lambda + \mu + 1)$ имеет вид (66). Численные эксперименты показали, что ряд в формуле (60) имеет очень быструю сходимость для всех значений параметра $\alpha \leq \pi$. Ниже приведены некоторые важные частные случаи, которые представляют интерес при решении различных задач дифракции:

Случай 1: $\lambda = \mu = 0$

$$Q_{kp}^{(1)} = \frac{2 \sin \pi \frac{k-p}{2}}{\pi k^2 - p^2} \frac{1}{\left(\frac{p-k}{2} + 1\right)\left(\frac{p+k}{2} + 1\right)} = \begin{cases} \frac{1}{2k}, & k = p, \\ 0, & k \neq p, k + p = \text{even}, \end{cases} \quad (67)$$

$$Q_{00}^{(1)} = -\ln\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (68)$$

Случай 2: $\lambda = 0, \mu = 1$

$$Q_{kp}^{(1)} = \alpha \frac{\sin \pi \frac{k-p}{2}}{k^2 - p^2} \frac{1}{\left(\frac{p-k}{2} + 1\right)\left(\frac{p+k}{2} + 1\right)} = \begin{cases} \frac{\alpha}{4k(k+1)}, & k = p, \\ 0, & k \neq p, k + p = \text{even}. \end{cases} \quad (69)$$

Выводы. В статье показано, что ряды Шлемильха (Schlomilch) по функциям Бесселя тип (1) и (2) могут быть представлены в аналитической форме либо в виде рядов по элементарным функциям. Для наглядности, различные частные случаи (1) и (2), возникающие в различных задачах дифракции представлены отдельно. Полученные результаты интересны с математической точки зрения. Они могут рассматриваться как аналог интегралов Вебера – Шафхейтлина (Weber-Schafheitlina) для бесселевых функций для рядов Шлемильха (Schlomilch) (1) и (2). Следует особо отметить, что в математических

справочниках можно найти только частные случаи результатов данной статьи.

Приложение. Анализ $A_s^\pm, B_s^\pm, C_s^\pm$

1. Выражение для A_s^\pm имеет вид [11, стр. 372, 587]

$$A_s^\pm = \begin{cases} \frac{\pi \Gamma(s + \lambda + \mu + 1)}{2^{s+\lambda+\mu+1} \Gamma(\frac{k-p}{2} + \lambda + s + 1) \Gamma(\frac{p-k}{2} + \mu + s + 1)}, & k + p \geq 0, \\ \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{\Gamma(s + \lambda + \frac{1}{2})}{\Gamma(s + \lambda + 1)} \left[\Psi(\lambda + s + \frac{1}{2}) - (\Psi(s + \lambda + 1)) \right], & \lambda = \mu, k = p = 0. \end{cases}$$

Следует отметить, что для любого λ, μ и k, p A_{2s}^- должны быть рассчитаны только численно.

2. Для B_s^\pm мы имеем [11, стр. 369, 587]

$$B_s^\pm = \begin{cases} \frac{\Gamma(\lambda + \mu) \Gamma(\frac{k+p}{2} + s + 1)}{2 \Gamma(\frac{k+p}{2} + s + \lambda + \mu + 1)}, & \lambda + \mu > 0, k + p > 0, \\ \frac{1}{4} \frac{\Gamma(s + 1) \Gamma(\lambda + \mu)}{\Gamma(s + \lambda + \mu + 1)} [\Psi(s + 1) - \Psi(s + \lambda + \mu + 1)], & \lambda + \mu > 0, k = p = 0. \end{cases}$$

3. Для C_s^\pm имеем [11, стр. 373, 584, 587]

$$C_{2s}^\pm = \begin{cases} \frac{\pi(-1)^{\frac{k+p}{2}} \Gamma(2s+1)}{2^{2s}(s+1+\frac{k+p}{2})\Gamma(s+1-\frac{k+p}{2})}, & \text{если } s \geq \frac{k+p}{2}, \\ 0, & \text{если } s < \frac{k+p}{2}. \end{cases}$$

$$C_0^+ = \begin{cases} \pi, & \text{при } k = p = 0, \\ 0, & \text{при } k + p > 0, \end{cases}$$

$$C_0^- = \begin{cases} -\frac{\pi}{k+p}, & k+p = \text{четное и положительное,} \\ -\pi \ln 2, & k=p=0, \end{cases}$$

$$C_{2s}^- = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Gamma(s+\frac{1}{2})}{\Gamma(s+1)} \left[\Psi(s+\frac{1}{2}) - \Psi(s+1) \right], \quad k=p=0.$$

Список литературы: 1. *Велиев Э.И.* Дифракция волн на пересекающихся круговых цилиндрических телах / *Э.И. Велиев, В.П. Шестопалов* // Докл. АН СССР. – 1985. – Т. 282. – № 5. – С. 1094-1098. 2. *Вавилов В.Н.* Эффективный метод решения задачи дифракции волн на цилиндрическом экране / *В.Н. Вавилов, Э.И. Велиев, В.В. Веремей, В.П. Шестопалов* // ДАН СССР. – 1990. – №. 313. – С. 585-589. 3. *Vavilov V.* Electromagnetic wave diffraction by cylindrical bodies with edges / *V.N. Vavilov, E.I. Veliev* // *Electromagnetics*. – 1993. – Vol. 13. – P. 339-357. 4. *Гальченко Н.А.* Волноводы сложных сечений / *Н.А. Гальченко, В.С. Михалевский, Г.П. Синявский*. – Ростов-на Дону: Изд-во Ростовского ун-та. – 1978. –176 с. 5. *Hongo K.* Diffraction by a flanged parallel plate wave guide / *K. Hongo* // *Radio Science*. – 1972. – Vol. 7. – P. 955-963. 6. *Прудников А.П.* Интегралы и ряды. Специальные функции / *А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев*. – М.: Наука. – 1983. – Том 2. – 752 с. 7. *Хенл Х.* Теория дифракции / *Х. Хенл, А. Мауэ, К. Вестпфаль*. – М.: Мир, 1964. – 428 с. 8. *Ватсон Д.Н.* Теория Бесселевых функций. Т.1. – М.: ИЛ, 1949. – 1000 с. 9. *Абрамовиц М.* Справочник по специальным функциям / *М. Абрамовиц, И. Стиган*. – М.: Наука, 1979. – 832 с. 10. *Twersky V.* Elementry Function Representations of Schlomilch Series / *V. Twersky* // *Arch. Rational Mach. Anal.* – 1961. – Vol. 8. – P. 323-333. 11. *Градиштейн И.С.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / *И.С. Градиштейн, И.М. Рыжик*. – М.: Наука, 1971. – 1100 с. 12. *Бондаренко В.Ф.* Об эффективном суммировании рядов Шлемильха цилиндрических функций / *В.Ф. Бондаренко* // *Журнал вычисл. матем. и матем. физ.* – 1991. – С. 1081-1085. 13. *Ляхов Л.Н.* Многочлены Шлемильха. Интерполяционная формула Рисса для в-производной и неравенство Берштейна для дробных в-производных Вейля-Маршо / *Л.Н. Ляхов, Е.Л. Санина* // Доклады академии наук, математика. – 2007. – Т. 417. – № 5. – С. 592-596.

References:

1. Veliev, E.I., and Shestopalov, V.P. (1985). "Diffraction of waves on intersecting circular cylindrical bodies". *Paper presented at the AN SSSR*, Vol 282, Issue 5, 1985, pp.1094 - 1098.

2. Vavilov, V.N., Veliev, E.I., Veremey, V.V, and Shestopalov, V.P. (1990). "Effective method for solving the problem of wave diffraction on a cylindrical screen". *Paper presented at the AN SSSR*, Vol 313, 1990, pp.585-589.

3. Vavilov, V.N. (1993). "Electromagnetic wave diffraction by cylindrical bodies with edges". *Journal of Electromagnetics*, Vol. 13, 1993, pp 339-357.

4. Galchenko, N.A., Mikhalevsky, V.S, and Sinyavsky, G.P. (1978). *Waveguides of complex sections*. Rostov-on-Don, Publishing house of the Rostov University, Rostov, 176 p.

5. Hongo, K. (1972). "Diffraction by a flanged parallel plate wave guide". *Proceedings of the Radio Science*, Vol 7, pp. 955-963.

6. Prudnikov, A.P., Brychkov, Yu. A., and Marichev, O.I. (1983). *Integrals and series. Special functions*. Science, Mosscow, 1983, Vol. 2, 752 p.

7. Henl, H., Maue, A, and Westpal, C. (1964). *The theory of diffraction*. Mir, Moscow, 428 p.
8. Watson, D.N. (1949). *Theory of Bessel functions*. Vol. 1, IL, Moscow, 1000 p.
9. Abramovits, M., and Stegan, E. (1979). *Handbook of special functions*. Nauka, Moscow, 1979, 832 p.
10. Twersky, V. (1961). *Elementary Function Representations of Schlömilch Series*. Arch. Rational Mach. Anal., Vol. 8, pp. 323-333.
11. Gradshtein, E.S., and Ryzhik, I.M. (1971). *Tables of integrals, sums, series and products*. Nauka, Moscow, 1100 p.
12. Bondarenko, V.F. (1991). "On the effective summation of the Schlömilch series of cylindrical functions". *Calc. Math. and Math. fiz.*, pp. 1081-1085.
13. Lyakhov, L.N., and Sanina, E.L. (2007). "Polynomials of Slamnich". *The Riesz interpolation formula for the s-derivative and the Bernstein inequality for the Weyl-Marchaud fractional s-derivatives*. 2007. *Reports of the Academy of Sciences, Mathematics*, Vol. 417, pp. 592-596.

Статью представил д-р физ-мат. наук, проф. НТУ "ХПИ" Бреславский Д.В.

Поступила (received) 10.11.2017

Eldar Veliyev, Dr. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel: (057) 707-64-50, e-mail: veliev51@gmail.com, veliev@khi.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-3923-2901

УДК 004.94; 57-74

Про згортку рядів Шлемільха – нові уявлення / Велієв Е.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 5 – 24.

Розглянуто ряди Шлемільха (Schlomilch), які застосовуються при вирішенні різних завдань дифракції хвиль, при розрахунку хвилеводів складного перетину і т.д. Однак їх обчислення досить трудомістким. Тому пропонуються два нових подання рядів Шлемільха по функціям Бесселя, які використовують бистросходящієся ряди по елементарних функцій. В окремих випадках отримані аналітичні подання цих рядів. Також наводиться нове уявлення для функцій Бесселя. Табл.: 5. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: ряди Шлемільха, функції Бесселя, аналітичні уявлення.

УДК 004.94; 57-74

О свертке рядов Шлемильха – новые представления / Велиев Э.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 5 – 24.

Рассмотрены ряды Шлемильха (Schlomilch), которые применяются при решении различных задач дифракции волн, при расчете волноводов сложного сечения и т.д. Однако их вычисление весьма трудоемко. Поэтому предлагаются два новых представления рядов Шлемильха по функциям Бесселя, которые используют бистросходящієся ряды по элементарным функциям. В частных случаях получены аналитические представления этих рядов. Также приводится новое представление для функций Бесселя. Табл.: 5. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: ряды Шлемильха, функции Бесселя, аналитические представления.

UDC 004.94; 57-74

About the rollup of Schlomilch series – new representation / Veliev E.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 5 – 24.

Schlomilch series are considered, which are used in solving various problems of wave diffraction, in the calculation of waveguides of complex cross-section, etc. However, their calculation is very laborious. Therefore, two new representations of the Schlomilch series on Bessel functions are proposed, which use rapidly convergent series over elementary functions. In special cases, analytical representations of these series are obtained. A new presentation is also given for the Bessel functions. Tabl.: 5. Refs.: 11 titles.

Keywords: Schlömilch series, Bessel functions, analytic representations.

М.Г. ГАСАНОВ, канд. техн. наук, доц., Азербайджанский технический университет, Баку,
С.Г. ГАРДАШОВ, ст.преп., Азербайджанский технический университет, Баку

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КОММУТАТОРОВ

Проанализированы возможности применения пьезоэлектрических приводов для коммутации оптических каналов и предложен метод частотного согласования размеров элементов микропьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: пьезоэлектрический привод; оптический коммутатор; частотное согласование размеров элементов; микропьезоэлектрический двигатель.

Постановка проблемы. За сравнительно короткую историю развития оптических сетей было разработано огромное число различных типов коммутаторов оптических сигналов, основанных на самых различных физических принципах [1].

Главной задачей оптических коммутаторов является обеспечение максимально высокого быстродействия, достаточного для разрабатываемых терабитных оптических линий связи [2], эффективность [3] и обеспечение минимально возможной удельной стоимости, а также снижение потребляемой мощности по сравнению с существующими электронными аналогами. Решение этих задач возможно с применением традиционных механических, электрооптических, термооптических, жидкокристаллических, полупроводниковых, интегрально-оптических, микроэлектромеханических и других устройств.

В настоящее время наряду с другими микродвигателями благодаря простоте конструкции и дешевизне изготовления находят всё большее применение твёрдотельные микропьезоэлектрические двигатели (МПД). Принцип действия МПД основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте (ОПЭ), в них энергия колебательных движений частиц пьезоэлемента (ПЭ), возбуждаемых переменным напряжением, подаваемым на его электроды от ультразвукового генератора (УЗГ) посредством ударного взаимодействия, передаётся контактирующей с ним подвижной части (ПЧ). Переменным напряжением от УЗГ в ПЭ возбуждаются только продольные колебания по его длине, а в результате его ударного взаимодействия с ПЧ в нём возбуждаются и поперечные

(изгибные) колебания [5].

Многоканальный оптический коммутатор. Одним из перспективных путей решения проблемы является применение пьезоэлектрических микроприводов [4], на основе которых возможно создание новых многоканальных, многофункциональных пьезоэлектрических коммутаторов оптических каналов.

Обобщенную схему многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов представим в следующем виде (рис. 1)

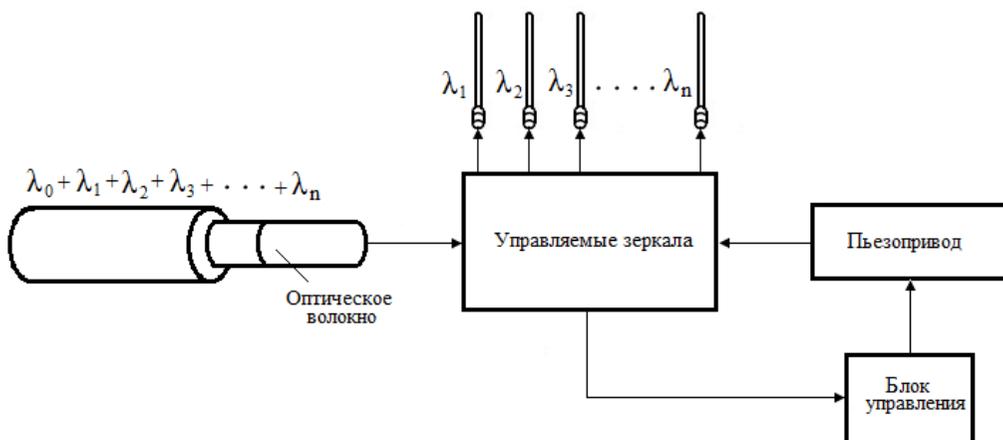


Рис.1. Обобщенная схема многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов

Как видно из рис. 1, мультиплексированный в единый оптический сигнал, поступающий из оптического волокна $\sum \lambda_n$, демультиплексируется своими составляющими λ_i посредством управляемых зеркал с помощью специального блока управления пьезоприводом вращательного движения. В данной схеме новизной является узел, созданный сочетанием управляемого зеркала оптического коммутатора с пьезоприводом линейного или вращательного движения.

Применение пьезоэлектрических многоканальных коммутаторов оптических каналов тесно связано с расчётом рабочих характеристик микропьезоэлектрических двигателей и оптимизацией параметров микропьезоэлектрических двигателей.

Частотное согласование размеров элементов пьезоэлектрического двигателя. Показатели качества МПД в основном зависят от характера взаимодействия ПЭ с ПЧ и от формы

траектории контактирующего с ПЧ конца ПЭ. Известно, что наилучшие показатели качества – сила тяги, быстродействие и к.п.д. МПД можно получить, когда эта траектория имеет форму эллипса и ПЭ в течение каждого периода колебаний входит в контакт с ПЧ один раз. Для этого частоты продольных и изгибных колебаний ПЭ должны быть равными, фазовый сдвиг между ними должен быть 90° , частота изгибных колебаний ПЧ должна равняться частоте колебаний ПЭ. Выполнение этих условий требует частотного согласования размеров ПЭ и ПЧ определённым образом. В работе [6] приведены формулы для согласования размеров только ПЭ, обеспечивающие приблизительное равенство частот его продольных и изгибных колебаний без учёта его взаимодействия с ПЧ, в результате чего при реальной работе (ПД) эффект согласования снижается.

Целью статьи является разработка для коммутаторов оптических систем нового метода передачи энергии, учитывающего взаимодействие ПЭ с ПЧ, применение которого позволяет более точно определить согласованные размеры не только ПЭ, но и ПЧ.

Основная часть. Принципиальная схема рассматриваемого МПД самой простой конструкции показана на рис. 2.

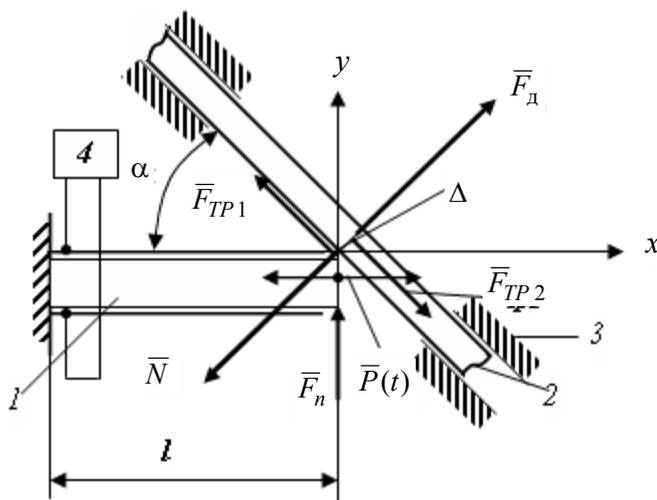


Рис. 2. Принципиальная схема МПД простой конфигурации

Здесь: 1 – пьезоэлемент, 2 – подвижная часть, 3 – направляющие опоры, 4 – ультразвуковой генератор.

Один конец ПЭ заделан, а другой, свободный конец, прижат силой \vec{F}_n под углом α к ПЧ, имеющей возможность двигаться поступательно в направляющих опорах. ПЭ и ПЧ имеют прямоугольные

сечения шириной a , a_1 и толщиной b , b_1 соответственно, длина ПЭ l , расстояния между направляющими опорами l_1 .

Динамика взаимодействия ПЭ и ПЧ описывается системой дифференциальных уравнений в операторной форме [7]:

$$\begin{cases} u(t) = L_u(l, s)[P(t) - \Phi_x(u, w, su, sw)], \\ w(t) = -L_w(l, s)[P_n(t) - \Phi_y(u, w, su, sw)], \end{cases} \quad (1)$$

где u , w – относительные смещения контактирующих точек ПЭ и ПЧ соответственно по осям x и y , отсчитываемые от их начального неподвижного состояния; $P(t) = a_p \sin \omega t$ – сила, возникающая в результате ОПЭ, приложенная к свободному концу ПЭ, $\omega = 2\pi f$ круговая частота, $s = \partial/\partial t$; Φ_x , Φ_y – проекции нелинейной силы $\bar{\Phi}$ ударного взаимодействия между ПЭ и ПЧ на осях x и y :

$$\begin{aligned} \bar{\Phi} &= \bar{N} + \bar{F}_{Tp1}, \\ \bar{N} &= -\bar{F}_\partial, \quad \bar{F}_{Tp1} = -\bar{F}_{Tp2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где \bar{F}_∂ – сила давления на ПЧ, \bar{F}_{Tp1} , \bar{F}_{Tp2} – силы трения, действующие, соответственно, на ПЭ и ПЧ.

В соотношениях (1) $L_u(l, s)$, $L_w(l, s)$ – операторы суммарных динамических податливостей контактирующих элементов ПЭ и ПЧ, определяемые при единичной гармонической силе ($a_p = 1$), действующей на свободный конец ПЭ:

$$\begin{cases} L_u(l, s) = \frac{l}{ES\xi_u} \left(\operatorname{tg} \xi_u - j \frac{\chi}{4\pi} \frac{0.5 \sin 2\xi_u}{\cos^2 \xi_u} \right), \\ L_w(l, s) = \frac{EI}{l^3} (A + jB), \end{cases} \quad (3)$$

где

$$A = \frac{\operatorname{ch} \xi_w \sin \xi_w - \operatorname{sh} \xi_w \cos \xi_w}{\xi_w^3 (1 + \operatorname{ch} \xi_w \cos \xi_w)}, \quad (4)$$

$$B = \frac{\chi \left[\frac{\xi_w}{2} (\operatorname{ch} 2\xi_w - \cos 2\xi_w) + 2\xi_w \operatorname{sh} \xi_w \sin \xi_w + (1 + \operatorname{ch} \xi_w \cos \xi_w) D \right]}{\xi_w^3 (1 + \operatorname{ch} \xi_w \cos \xi_w)}, \quad (5)$$

где $D = (\operatorname{ch}\xi_w \sin \xi_w - \operatorname{sh}\xi_w \cos \xi_w)$, E – модуль упругости ПЭ; S – площадь поперечного сечения ПЭ; χ – коэффициент поглощения; $I = \frac{1}{12} ab^3$ – момент инерции поперечного сечения ПЭ; $\xi_u = \frac{\omega l}{\gamma}$;

$$\gamma = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad \xi_w = l^4 \sqrt{\frac{\rho \omega^2 S}{EI}}; \quad \rho \text{ – плотность ПЭ.}$$

Отыскивая решения системы уравнений (1) в виде :

$$u(t) = m_u + u^0(t) = m_u + a_u \sin(\omega t - \varphi_u), \quad (6)$$

$$w(t) = m_w + w^0(t) = m_w + a_w \sin(\omega t - \varphi_w), \quad (7)$$

где m_u, m_w и u^0, w^0 – постоянные и переменные составляющие $u(t)$ и $w(t)$, производим гармоническую линейризацию силы ударного взаимодействия [8]:

$$\Phi_X(u, su) \approx m_{Fu}(m_u, a_u) + k_u(m_u, a_u)u^0 + \beta_u(m_u, a_u)su^0, \quad (8)$$

$$\Phi_Y(w, sw) \approx m_{Fw}(m_w, a_w) + k_w(m_w, a_w)w^0 + \beta_w(m_w, a_w)sw^0, \quad (9)$$

$m_{Fu}, m_{Fw}, k_u, k_w, \beta_u, \beta_w$ – коэффициенты гармонической линейризации:

$$m_{Fu} = \frac{a_u}{2\pi} c \sin \alpha [D_u (2 \arcsin D_u - \pi) + 2 \sin \alpha \sqrt{1 - D_u^2}], \quad (10)$$

$$k_u = \frac{1}{\pi} \{ [c \sin \alpha \cos \varphi_u (\sin \alpha - 2) - \mu \omega \cos^2 \alpha \sin \varphi_u] D_u \sqrt{1 - D_u^2} + 0.5 (c \sin^2 \alpha \cos \varphi_u + \mu \omega \cos^2 \alpha \sin \varphi_u) (\pi - 2 \arcsin D_u) \}, \quad (11)$$

$$\beta_u = \frac{1}{\pi \omega} \{ [c \sin \alpha \sin \varphi_u (2 - \sin \alpha) - \mu \omega \cos^2 \alpha \cos \varphi_u] D_u \sqrt{1 - D_u^2} + 0.5 (\mu \omega \cos^2 \alpha \cos \varphi_u - c \sin^2 \alpha \sin \varphi_u) (\pi - 2 \arcsin D_u) \}, \quad (12)$$

$$m_{Fw} = \frac{a_w}{2\pi} c \cos \alpha [D_w (2 \arcsin D_w - \pi) + 2 \sin \alpha \sqrt{1 - D_w^2}], \quad (13)$$

$$k_w = \frac{1}{\pi} \{ [c \cos \alpha \cos \varphi_w (\cos \alpha - 2) - \mu \omega \sin^2 \alpha \sin \varphi_w] D_w \sqrt{1 - D_w^2} + 0.5 (c \cos^2 \alpha \cos \varphi_w + \mu \omega \sin^2 \alpha \sin \varphi_w) (\pi - 2 \arcsin D_w) \}, \quad (14)$$

$$\beta_w = \frac{1}{\pi\omega} \{ [c \cos\alpha \sin\varphi_w (2 - \cos\alpha) - \mu\omega \sin^2\alpha \cos\varphi_w] D_w \sqrt{1 - D_w^2} + 0.5(\mu\omega \sin^2\alpha \cos\varphi_w - c \cos^2\alpha \sin\varphi_w)(\pi - 2\arcsin D_w) \}, \quad (15)$$

где c – коэффициент жесткости ПЧ; μ – коэффициент трения между ПЭ и ПЧ;

$$D_u = \frac{\Delta - m_u \sin\alpha}{a_u}, \quad D_w = \frac{\Delta - m_w \cos\alpha}{a_w}, \quad (16)$$

Δ – зазор (натяг) между ПЭ и ПЧ.

Решая систему (1) с учетом (3) – (15) получена система трансцендентных уравнений, определяющих неизвестные параметры искомого решения $m_u, m_w, a_u, a_w, \varphi_u, \varphi_w$:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_u = \frac{a_p}{\sqrt{U_u^2 + V_u^2}}, \\ \varphi_u = \arctg \frac{V_u}{U_u}, \\ U_w = 0, \\ V_w = 0, \\ m_u = -\frac{l}{ES} m_{Fu}, \\ m_w = \frac{l^3}{EI} (F_n - m_{Fw}), \end{array} \right. \quad (17)$$

где

$$U_u = \frac{ES}{l} (\zeta_u \operatorname{ctg}\zeta_u + k_{ul}), \quad (18)$$

$$V_u = \frac{ES}{l} (\omega\beta_{ul} + \frac{\chi\zeta_u}{4\pi} \frac{\zeta_u + 0.5 \sin 2\zeta_u}{\sin^2 \zeta_u}), \quad (19)$$

$$U_w = \frac{EI}{l^3} \left(\frac{A}{A^2 + B^2} + k_{wl} \right), \quad (20)$$

$$V_w = \frac{EI}{l^3} \left(\frac{B}{A^2 + B^2} + \omega\beta_{wl} \right), \quad (21)$$

$$k_{ul} = \frac{l}{ES} k_u, \quad \beta_{ul} = \frac{l}{ES} \beta_u, \quad k_{wl} = \frac{l^3}{EI} k_w, \quad \beta_{wl} = \frac{l^3}{EI} \beta_w, \quad (22)$$

где U_w, U_w и V_w, V_w – вещественные и мнимые части соответственно суммарных динамических жесткостей W_U, W_W контактирующих элементов ПЭ и ПЧ:

$$\begin{cases} W_U = L_U^{-1}(l, s) + k_u + \beta_u s, \\ W_W = L_W^{-1}(l, s) + k_w + \beta_w s. \end{cases} \quad (23)$$

Для согласования размеров ПЧ выведены следующие формулы:

$$c = 3.2 E_1 a_1 \left(\frac{b_1}{l_1} \right)^3, \quad (24)$$

$$f = 0.68 \frac{b_1}{l_1^2} \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}, \quad (25)$$

где c, f – жесткость и собственная частота изгибных колебаний ПЧ; E_1, ρ_1 – модуль упругости и плотность материала ПЧ.

Предлагается следующий порядок частотного согласования размеров ПЭ и ПЧ.

1) Выбирают материалы для ПЭ и ПЧ;

2) Изменяя в формулах (24), (25) размеры a_1, b_1 , и расстояние l_1 между опорами, определяют интервалы допустимых из конструктивных соображений значений жесткости ($c_{min} \div c_{max}$) и собственной частоты изгибных колебаний ($f_{min} \div f_{max}$) ПЧ;

3) Для конкретного значения c , взятого из указанного в п.2 интервала, согласуют размеры ПЭ. Т.е. изменяя размеры a, b, l ПЭ, добиваются равенства собственных частот продольных и изгибных колебаний по длине ПЭ. С этой целью используют уравнения, определяющие совокупность этих собственных частот:

$$\begin{cases} U_u = U'_u(f, l) + U''_u(f, a, b, l, D_u, c) = 0, \\ U_w = U'_w(f, l) + U''_w(f, a, b, l, D_w, c) = 0. \end{cases} \quad (26)$$

Рекомендуется решать систему уравнений (26) графически, построением с помощью компьютера в одной системе координат графиков функций $U'_u(f)$ и $-U''_u(f)$, а в другой – графиков

$U'_w(f)$ и $-U''_w(f)$, на которых будут наглядно видны все моды собственных частот.

С учетом условия $\varphi_u - \varphi_w = 90^0$, $\varphi_u = 90^0$ графики $U''_u(f)$ и $U''_w(f)$ представляют собой прямые, угловые коэффициенты которых при заданных c, μ, α зависят соответственно только от D_u и D_w . Так как $|D_u| \leq 1$ и $|D_w| \leq 1$, эти уравнения решаются только для значений: $D_u = -1, D_u = 1$ и $D_w = -1, D_w = 1$. Решение для других значений D_u и D_w будут между полученными выше решениями. Довольно легко достигается равенство первой моды собственных частот продольных колебаний и второй моды собственных частот изгибных колебаний. Фиксируем D_u и D_w , при которых $f = f_u = f_w$. Полученная частота должна входить в допустимый интервал (п. 2). В противном случае, изменив c, a, b, l , необходимо повторить расчет по п.2, п.3.

4) Подставив частоту $f = f_u = f_w$ в выражения $a_u = |L_u(l, s)|$ и $a_w = |L_w(l, s)|$ определяют начальные приближенные значения a_u, a_w .

5) Решают систему из четырех уравнений, полученную из (17) с учетом $f = f_u = f_w$, начальные значения $a_u, a_w, \varphi_u = 90^0, \varphi_w = 0, U_u = 0, U_w = 0$ и $a_p = 1$ относительно a_u, m_u, a_w, m_w .

6) Используя результаты п. 5 по соотношениям (16) уточняют D_u и D_w , согласно п. 3 скорректируется частота $f = f_u = f_w$.

7) Согласуются размеры ПЧ. Подставив $f = f_u = f_w$ из п. 6. в (25), определяют отношение $\frac{b_1}{l_1^2}$. Задаваясь значением $b_1 \leq a_1$, определяют l_1 . Наконец из формулы (24) определяют a_1 . С точки зрения наилучшей передачи энергии от ПЭ к ПЧ, желательно выполнение условия:

$$a \leq a_1.$$

Выводы. В соответствии с изложенным можно заключить что, согласованные по предложенному методу размеры пьезоэлемента и подвижной части обеспечивают наилучшую передачу энергии от ПЭ КПЧ и наилучшую передачу энергии от ПЭ к ПЧ, позволяющих их эффективно применять в коммутаторах оптических каналов.

Список литературы: 1. *Гайворовская Г.С.* Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях / *Г.С. Гайворовская, А.В. Рябцов* // *Applicable Information Models*. – Sofia: ITNEA, 2011. – № 22. – P. 169-181.

2. *Гайворовская Г.С.* Особенности коммутации оптических сигналов при использовании различных режимов переноса информации / *Г.С. Гайворовская, Б.А. Рыбалов.* – 2015. – С. 1-7 <http://journals.uran.ua/reftech/article/viewFile/51945/52999>
3. *Гасанов М.Г.* Эффективность пьезоэлектрического дефлектора светового луча в технике связи / *М.Г. Гасанов* // Известия АзТУ.– Баку – 2010 – № 2 (66). – С. 44-46.
4. *Hasanov M.H.* Application of piezoelectric light beam deflector in optical commutators of fiber-optical communication networks / *M.H. Hasanov, V.A. Maharramov* // The international science-technical journal HEARD of the Azerbaijan Engineering Academy. – 2017. – Vol. 9. – № 2. – P. 116-121.
5. *Гасанов М.Г.* Пьезоэлектрический реверсивный привод / *М.Г. Гасанов, В.С. Вишневецкий* // Авт. Свид. СССР № 1827708. – 1995.
6. *Джагунов Р.Г.* Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике / *Р.Г. Джагунов, А.А. Ерофеев* // Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение. – 1986. – 165 с.
7. *Гардашов С.Г.* Постановка и выбор метода решения задачи исследования динамики виброударного взаимодействия в пьезоэлектрическом двигателе / *С.Г. Гардашов, Т.Б. Гурбанов, Х.Г. Гардашова, Э.Т. Газарханов, Т.И. Кяримли* // Милли Авиасийа Академийасы, Елми мяжмуяляр. – Баку. – 2003. – Том 5. – № 4. – С. 36-40.
8. *Гардашов С.Г.* Гармоническая линейаризация силы ударного взаимодействия в ПД / *С.Г. Гардашов, Т.Б. Гурбанов, Х.Г. Гардашова* // АзТУ, Елми ясярляр – Фундаментал елмляр. – Баку. – 2003, – № 3. – Том II (7). – С. 20-24.
9. *Hasanov M.H.* Multifunctional multichannel piezoelectric switch for optical networks. Modern means of communication // Materials of the XXII International Scientific and Technical Conference. 19-20 October 2017. – Minsk: Belarus. – P. 16-17.
10. *Hasanov M.H.* Physical and mathematical model of nonlinear piezoelectric transducers for linear displacements. Actual problems of science and technology // X International scientific-practical conference of young scientists. Collection of conference materials. – Publishing house "Neftegazovoye delo", 25-26 November. – Ufa: Russian, 2017. – Vol. 1. – P. 292-293.

References:

1. Gaivorovskaya, G.S and Ryabtsov, A.B. (2011), "Features of the use of optical switches in modern information networks", *Journal of Applicable Information Models*, Sofia, No. 22, pp. 169-181.
2. Gaivorovskaya, G.S. and Rybalov, B.A. (2015). "Features of switching optical signals when using different modes of information transfer", available at: <http://journals.uran.ua/reftech/article/viewFile/51945/52999>, (accessed 2 January 2011).
3. Hasanov, M.H. (2010), "Efficiency of a piezoelectric deflector for a light beam in communication technology", *Journal Proceedings of AzTU*, No. 2 (66), Baku, pp. 44-46.
4. Hasanov, M.H. and Maharramov, V.A. (2017), "Application of piezoelectric light beam deflector in optical commutators of fiber-optical communication networks", *The international science - technical journal HEARD of the Azerbaijan Engineering Academy*, Vol. 9, No. 2, pp. 116-121.
5. Hasanov, M.H. and Vishnevsky, V.S. (1995). Piezoelectric reversible drive, Patent, USSR, No. 1827708.
6. Jagupov, R.G. and Erofeev, A.A. (1986) , "*Piezoceramic elements in instrumentation and automation*", "Mechanical Engineering", Leningrad Branch, Leningrad, 165 p.
7. Gardashov, S.G., Gurbanov, T.B., Gardashova, Kh.G., Gazarkhanov, E.T. and Kyarimli, T.I. (2003). "Statement and choice of the method for solving the problem of studying the dynamics of vibroimpact interaction in a piezoelectric engine", *Journal National Aviation Academy*, Scientific-notes , Vol. 5, No. 4, Baku, pp. 36-40.
8. Gardashov, S.G., Gurbanov, T.B. and Gardashova, H.G. (2003), "Harmonic Linearization of the Shock Interaction Force in PD", *Journal Proceedings of AzTU*, Baku, Vol. II, No. 3, pp. 20-24.

9. Hasanov, M.H. (2017), "Multifunctional multichannel piezoelectric switch for optical networks". *Modern means of communication, Materials of the XXII International Scientific and Technical Conference, 19-20 October 2017, Minsk, Belarus*, pp. 16-17.

10. Hasanov, M.H. (2017), Physical and mathematical model of nonlinear piezoelectric transducers for linear displacements, *Actual problems of science and technology - 2017. X International scientific-practical conference of young scientists. Collection of conference materials. Publishing house "Neftegazovoye delo"*, Ufa, Russian, Vol. 1, pp. 292-293.

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ"
Заковоротный А.Ю.*

Поступила (received) 15.11.2017

Mehman Huseyn Hasanov, Cand. Tech. Sci., Associate Professor
The Azerbaijan Technical University, Baku.
Ave. G. Javida, 25, Az-1073, Azerbaijan
Tel: + 994-(50)-211-22-83, email: mhasanovnew@gmail.com

Sadraddin G. Gardashov, senior teacher,
The Azerbaijan Technical University, Baku,
Ave. G. Dzhavida, 25, Az. 1073, Azerbaijan,
email: sqardashov52@mail.ru

УДК 621. 384.2

Визначення оптимальних розмірів елементів п'єзоелектричного двигуна для оптичних комутаторів / Мехман Гусейн оглы Гасанов, Садраддин Гудбиддин оглы Гардашов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 25 – 35.

Проаналізовано можливості застосування п'єзоелектричних приводів для комутації оптичних каналів і запропоновано метод частотного узгодження розмірів елементів мікроп'єзоелектричного двигуна для оптичних комутаторів. Ил.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: п'єзоелектричний привод; оптичний комутатор; частотне узгодження розмірів елементів; мікроп'єзоелектричний двигун.

УДК 621. 384.2

Определение оптимальных размеров элементов пьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов / Мехман Гусейн оглы Гасанов, Садраддин Гудбиддин оглы Гардашов // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 25 – 35.

Проанализированы возможности применения пьезоэлектрических приводов для коммутации оптических каналов и предложен метод частотного согласования размеров элементов микропьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: пьезоэлектрический привод; оптический коммутатор; частотное согласование размеров элементов; микропьезоэлектрический двигатель.

UDC 621. 384.2

Determination of the optimum sizes of the piezoelectric motor elements for optical switches / Hasanov M.H., Sadraddin G.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 25 – 35.

The possibilities of using piezoelectric drives for switching optical channels are analyzed and a technique for frequency matching of the sizes of elements of a micro-piezoelectric engine for optical commutators is proposed. Figs.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: piezoelectric drive; optical switches; frequency matching of the sizes of elements; micro piezoelectric engine.

УДК 519.216:519.246, 004.056.5 DOI: 10.20998/2411-0558.2017.50.07

А.О. ПОДОРОЖНЯК, канд. техн. наук, с.н.с., доц., НТУ "ХПІ",
М.Г. ТОКАРЕВ, магістр, НТУ "ХПІ"

МЕТОД ГЕНЕРАЦІЇ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ЧИСЕЛ ВИСОКОЇ СТІЙКОСТІ

Розглянуто криптостійкі детерміновані генератори псевдовипадкових чисел, джерела випадкових чисел і методи генерації псевдовипадкових чисел з використанням апаратних джерел ентропії. Приведено модифікований авторами метод генерації псевдовипадкових чисел високої стійкості з використанням словника та апаратних джерел ентропії різного фізичного походження. Представлені результати роботи розробленого пристрою для генерації паролів на мікроконтролері, що реалізує запропонований модифікований метод генерації псевдовипадкових чисел та зроблений порівняльний аналіз отриманих результатів з сучасними загальновідомими методами. Лл.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: криптостійкість, генератор псевдовипадкових чисел, пароль, мікроконтролер.

Постановка проблеми та аналіз публікацій і досягнень.

Сучасна інформатика широко використовує псевдовипадкові числа в самих різних галузях – від імітаційного моделювання до криптографії. При цьому від якості використаних генераторів псевдовипадкових чисел (ГПВЧ) безпосередньо залежить якість одержуваних результатів.

Розглянемо такі загально застосовувані методи генерації псевдовипадкових чисел як ISO C Random і xxHash.

ISO C Random – стандартний генератор псевдовипадкових чисел мови C. В якості початкового зсуву, як правило, використовується поточний час в мілісекундах. Дане значення перетворюється за допомогою ряду математичних перетворень у вихідний символ пароля. Наступні символи в якості початкового зсуву використовують попереднє значення до перетворення в символ пароля.

Одним з головних недоліків даного методу є те, що всі символи (крім першого) залежать від попереднього, а отже – знаючи кілька, або навіть один символ, можливо отримати всю послідовність (або кілька послідовностей). Також цей алгоритм має нерівномірність розподілу послідовностей (особливо коротких) отриманих даним методом [1].

xxHash – хеш-функція загального призначення, відрізняється високою швидкістю роботи. Дана хеш-функція формується за допомогою ряду математичних перетворень масиву вхідних значень (він може складатися і з одного елемента – наприклад, поточний час в мілісекундах) в масив вихідних значень. Алгоритм роботи даного методу представлений на рис. 1, k21-k24 – це спеціально підібрані

константи ("магічні числа"), за допомогою яких налагоджують більш рівномірний розподіл отримуваних послідовностей [2].

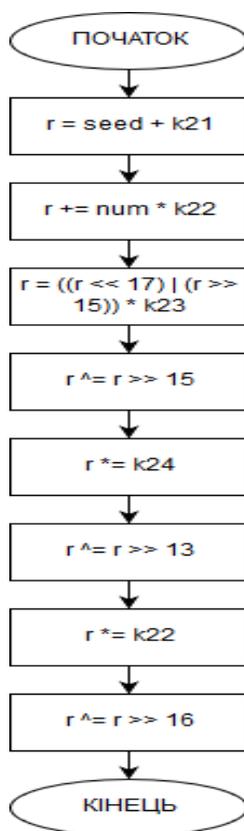


Рис. 1. Блок-схема алгоритму xxGetHash

До плюсів даного методу генерації псевдовипадкових чисел можна віднести те, що кожен символ генерується окремо і не залежить від попереднього значення, однак і цей метод слабо підходить для генерації криптостійких послідовностей псевдовипадкових чисел, так як при використанні недостатньо великого масиву вхідних значень утворюються не рівнорозподілені послідовності.

Недоліком вище перелічених методів є те, що за вхідним обмеженим масивом генеруються набагато більший масив. Це дозволяє скомпрометувати отриману послідовність за обмежений термін часу, знаючи (припускаючи) початковий зсув, або одне чи декілька значень послідовності [3].

Тому доцільно використовувати методи роботи ГСПЧ, які базуються на генерації вихідної послідовності за вхідним масивом, що дорівнює або перевищує розмірність вихідної послідовності.

Таким чином, проблемою є використання відомих програмних методів генерації псевдовипадкових чисел для створення захищених паролів, що призводить до недостатньо криптостійких та надійних результатів. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є застосування випадкових чисел, одержуваних з фізичних джерел в якості породжуючих елементів для програмних ГСПЧ.

Для застосування у криптографії необхідний метод генерації паролів гарантованої стійкості [4, 5], який використовує перетворення джерел ентропії в символи пароля. В якості таких апаратних джерел ентропії можуть використовуватися датчики [6, 7], які можуть забезпечити ентропію не менш заданого рівня, наприклад: температурні датчики, інтервали між натисканнями клавіш тощо.

Генерація криптостійких псевдовипадкових послідовностей з використанням апаратного джерела ентропії. Даний метод генерує пароль посимвольно, перетворюючи інтервал часу між натисканнями клавіш в черговий символ – тому для 16-ти символьного пароля потрібно 16 натискань. Алгоритм роботи даного методу представлений на рис. 2.

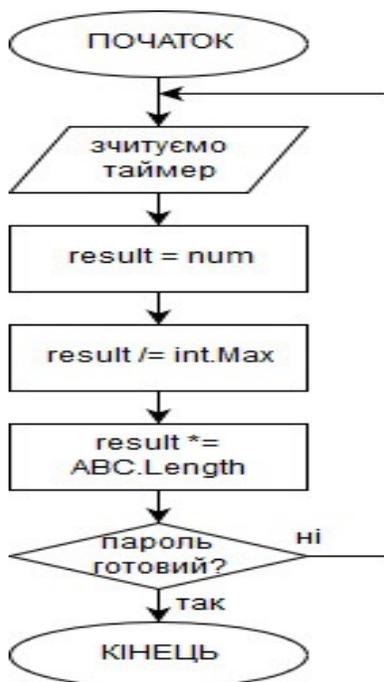


Рис. 2. Блок-схема алгоритму запропонованого методу

Слід також зазначити, що даний метод вимагає постійної безпосередньої участі користувача, через що генерація великих послідовностей, як показано на рис. 3, може зайняти багато часу. У зв'язку з цим, застосування цього методу обмежено тими областями в яких не потрібно генерувати великі послідовності псевдовипадкових чисел.

Пропонований метод дозволяє генерувати найбільш рівномірно розподілені і безпечні паролі, однак вимагає більшої участі користувача і потребує більше часу на свою реалізацію.

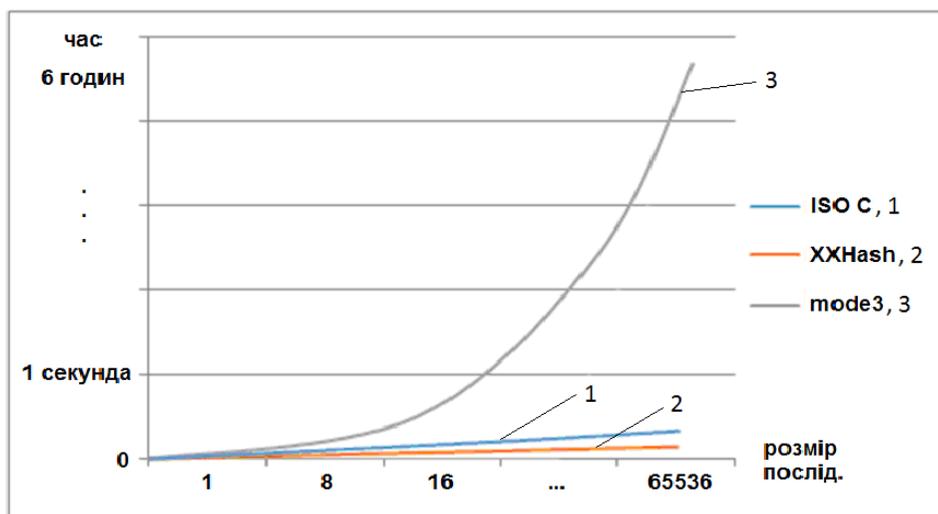


Рис. 3. Порівняння часу роботи розглянутих методів ГПВЧ

Критерій якості методів генерації псевдовипадкових чисел.

Для тестування якості ГПВЧ існують різні методи. Можливо використовувати для подібних цілей ENT – програму тестування псевдовипадкових числових послідовностей. Зазвичай під якістю ГПВЧ мається на увазі як швидкість генерації послідовності певної довжини, так і рівномірність розподілу згенерованої послідовності [8, 9].

Значущими параметрами для оцінки якості згенерованих послідовностей були обрані такі характеристики: інформаційна ентропія, середнє значення і коефіцієнт кореляції.

Ентропія вимірює середню кількість інформації на символ джерела або, іншими словами, невизначеність, пов'язану з джерелом. $H(A) = H(a_1, \dots, a_i, \dots, a_q) = 0$ означає, що джерело не випадкове і $H(A)$ максимальна, коли всі a_i рівновірогідні. Ентропія визначається виразом [10]

$$H_r(A) = \sum_{i=1}^q p(a_i) \log_r \left[\frac{1}{p(a_i)} \right], \quad (1)$$

де q – кількість можливих станів, $p(a_i)$ – імовірність появи стану a_i .

Середнє арифметичне множини чисел – сума всіх чисел, поділена на їх кількість. Визначається виразом

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

де n – розмір множини, x_i – значення i -го елемента множини.

Лінійний коефіцієнт кореляції вимірює, наскільки кожен елемент псевдовипадкової послідовності залежить від попереднього. Для випадкових послідовностей це значення буде близьким до нуля. Визначається виразом [11]

$$r_{XY} = \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})(Y_t - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2 \sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

де n – розмір послідовностей, X_t, Y_t – елементи послідовностей, \bar{X}, \bar{Y} – середні значення вибірок.

Якість окремо взятої характеристики розраховується як відношення різниці еталонного значення і поточного до різниці еталонного значення і максимально допустимого

$$Q_i = 1 - \frac{|v_e - v_i|}{|v_e - v_m|}, \quad (4)$$

де v_e – еталонне значення обраної характеристики, v_i – отримане значення обраної характеристики, а v_m – граничне значення обраної характеристики.

Граничне значення обраної характеристики v_m обирається у інтервалі від 0 до еталонного значення v_e . У часто використовуваному випадку v_m дорівнює 0, і тоді якість може бути розраховано за нижченаведеною формулою

$$Q_i = 1 - \frac{|v_e - v_i|}{|v_e|}. \quad (5)$$

Загальна якість обраного методу вважається як середнє зважене для всіх показників

$$Q_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^m w_i} \sum_{i=1}^m w_i Q_i, \quad (6)$$

де m – кількість оцінюваних характеристик; w_i – ваговий коефіцієнт (від 0 до 1); Q_i – якість i -й характеристики.

Мета статті – обґрунтування методу генерації криптостійких псевдовипадкових послідовностей з використанням анархних джерел ентропії.

Розробка пристрою генерації паролів. Був розроблений пристрій, який забезпечує виконання таких функцій: вимірювання температури і часу між натисканнями по запити; вибір методу генерації пароля; генерація пароля з використанням зчитаних даних в якості анархних джерел ентропії відповідно до обраного методу; відображення даних на дисплеї. Налаштування пристрою було проведено в системі схемотехнічного моделювання та на стенді.

Розроблена програма дозволяє згенерувати пароль трьома різними способами: за допомогою стандартного C генератора ISOCRandom, за допомогою спрощеного варіанту швидкого xxHash і без використання ГПСЧ. ISOCRandom використовує в якості сида (джерела ентропії) поточне значення температури і поточне значення таймера, пароль генерується посимвольно. xxHash також використовує в якості джерела ентропії поточне значення температури і поточне значення таймера, однак пароль генерується одноразово. Третій метод генерує пароль посимвольно, перетворюючи інтервал часу між натисканнями клавіш в черговий символ – тому для 16-ти символьного пароля потрібно 16 натискань. Рівномірність розподілу чисел в першому випадку – мінімальна, в разі ж використання xxHash – вона зростає. Крім того, xxHash генерує за один раз весь пароль внаслідок чого пароль генерується швидше. Третій варіант дозволяє генерувати найбільш рівномірно розподілені і безпечні паролі, однак вимагає більшої участі користувача і потребує більше часу на свою реалізацію.

Для генерації паролів було застосовано мікроконтролер PIC16F877, в якості зовнішніх джерел ентропії – таймери і температурний датчик DS18S20, згенерований пароль виводився на дисплей. Для написання прошивки (програми мікроконтролера) використано середовище розробки MicroC for PIC.

Після створення програми та моделювання її роботи у середовищі Proteus 8, було проведене успішне натурне тестування роботи розробленого програмно-апаратного пристрою створення криптостійких псевдовипадкових послідовностей на стенді PIC EASY.

Для оцінки якості отриманих псевдовипадкових послідовностей використовувались згенеровані пристроєм послідовності з 65535 відліків.

Результати порівняння якості розглянутих методів генерації псевдовипадкових чисел за формулою 4 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння якості розглянутих методів ГПВЧ за формулою 4

Характеристики	ISO C Random		xxHash		mode3	
	значення	якість	значення	якість	значення	якість
Інформаційна ентропія	7,98208	98,21%	7,99578	99,58%	7,99758	99,76%
Середнє значення	127,225	96,33%	127,773	96,36%	127,373	98,31%
Коефіцієнт кореляції	0,00816	91,84%	0,00514	94,87%	0,00095	99,05%
Якість ГПВЧ	95,46%		96,93%		99,04%	

Результати порівняння якості розглянутих методів генерації псевдовипадкових чисел за формулою 5 наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння якості розглянутих методів ГПВЧ за формулою 5

Характеристики	ISO C Random		xxHash		mode3	
	значення	якість	значення	якість	значення	якість
Інформаційна ентропія	7,982082	99,78%	7,995784	99,95%	7,997577	99,97%
Середнє значення	127,2246	99,78%	127,7733	99,79%	127,373	99,90%
Коефіцієнт кореляції	0,008159	99,18%	0,005135	99,49%	0,000954	99,90%
Якість ГПВЧ	99,58%		99,74%		99,92%	

Як видно з таблиці, запропонований метод дає більш рівномірний розподіл і більш непередбачувані послідовності. Проведений натурний експеримент показав збіг даних, отриманих при моделюванні у середовищі Proteus 8, з даними, отриманими на стенді PIC EASY.

Висновки. Розроблено метод генерації псевдовипадкових чисел, який використовує в якості апаратних джерел ентропії інтервали між

натисканнями клавіш і датчик температури. Було проведено тестування і порівняння запропонованого методу із загальнодоступними методами генерації псевдовипадкових чисел.

Також було розроблено мікроконтролерний пристрій, що дозволяє генерувати паролі декількома різними методами з використанням датчика температури і часу між натисканнями клавіш, як апаратних джерел ентропії. Розроблена програма дозволяє генерувати пароль одним із трьох вибраних різних способів: за допомогою модифікованого стандартного C генератора ISOCRandom, за допомогою модифікованого спрощеного варіанту швидкого xxHash та генеруючи пароль посимвольно, перетворюючи інтервал часу між натисканнями клавіш в символ. Рівномірність розподілу чисел (а відповідно – і його криптостійкість) в першому випадку – мінімальна, в разі ж використання xxHash – вона зростає. Крім того, xxHash генерує за один раз весь пароль, внаслідок чого пароль генерується швидше. Третій варіант дозволяє генерувати найбільш рівномірно розподілені та безпечні паролі, однак вимагає більшої участі користувача і потребує більше часу на свою реалізацію.

Список літератури: 1. *Лобода Є.О.* Мікропроцесорний генератор паролів / *Є.О. Лобода, А.О. Подорожняк, М.Г. Токарев* // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Матеріали сьомої НТК. – Харків: ДП "ХНДІ ТМ", ПНТУ, Полтава; КЛА НАУ, Кропивницький; Військова академія ЗС Азербайджанської республіки, Баку, 2017. – С. 58-59. 2. *Токарев М.Г.* Генерація і побудова тривимірних зображень ландшафту в реальному часі / *М.Г. Токарев, А.О. Подорожняк* // XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів: матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 3. – Харків: НТУ "ХПІ", 2017. – С. 142-143. 3. *Шнейер Б.* Прикладная криптография / *Б. Шнейер*. – М.: Триумф, 2016. – 1024 с. 4. *Фороузан Б.А.* Математика криптографии и теория шифрования / *Б.А. Фороузан*. – М.: НОУ "Интуит", 2016. – 510 с. 5. *Тилборг ван Х.К.А.* Основы криптологии. Профессиональное руководство и интерактивный учебник / *Х.К.А. Тилборг ван*. – М.: Мир, 2006. – 471 с. 6. *Cheung R.C.C.* Hardware generation of arbitrary random number distributions from uniform distributions via the inversion method / *R.C.C. Cheung, D.U. Lee, W. Luk, J.D. Villasenor* // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2007. – Vol. 15. – № 8. – P. 952-962. 7. *Шарапов В.М.* Датчики / *В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков*. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с. 8. *Rukhin A.* A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications / *A. Rukhin, J. Soto, J. Nechvatal, M. Smid, E. Barker, S. Leigh, M. Levenson, M. Vangel, D. Banks, A. Heckert, J. Dray, S. Vo*, available at: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-22-rev1a/SP800-22rev1a.pdf> (accessed 14 September 2017). 9. *Верещагин Н.К.* Колмогоровская сложность и алгоритмическая случайность / *Н.К. Верещагин, В.А. Успенский, А. Шень*. – М.: МЦНМО, 2013. – 576 с. 10. *Hamming R.W.* Coding and Information Theory. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 1980 – 104 p. 11. *Knuth D.E.* Art of Computer Programming, Vol. 2: Seminumerical Algorithms. Reading MA: Addison-Wesley Professional, 2014. – 784 p.

References:

1. Loboda, Ye.O., Podorozhnyak, A.O. and Tokarev, M.G. (2017), "Microprocessor Password Generator", *Modern directions of development of information and communication technologies*

and means of management. Proceedings of the 7th International Conference, April 20-21, State Enterprise "KhNDI TM", Kharkiv; PNTU, Poltava; Military Academy of the Armed Forces of the Republic of Azerbaijan, Baku, pp. 58-59.

2. Tokarev, M.G. and Podorozhnyak, A.O. (2017), "Generation and construction of three-dimensional landscape images in real time", *Proceedings of the 11th International scientific and practical conference of graduate students and postgraduate students, April 18-21, 2017, Kharkiv, NTU "KhPI", Vol. 3, pp. 142-143.*

3. Schneier, B. (2016), *Applied Cryptography*, Triumph, Moscow, 1024 p.

4. Forouzan, B.A. (2016), *Mathematics of cryptography and the theory of encryption*, National Open University "Intuit", Moscow, 510 p.

5. Tilborg, H.C.A. (2006), *Fundamentals of Cryptology: A Professional Reference and Interactive Tutorial*, Mir, Moscow, 471 p.

6. Cheung R.C.C., Lee, D.U., Luk, W. and Villasenor, J.D. (2007), "Hardware generation of arbitrary random number distributions from uniform distributions via the inversion method", *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Vol. 15, No. 8, pp. 952-962.

7. Sharapov, V.M., Polishchuk, E.S., Koshevoi, N.D., Ishanin, G.G., Minaev, I.G. and Sovluskov, A.S. (2012), *Sensors*, Technosphere, Moscow, 624 p.

8. Rukhin, A., Soto, J., Nechvatal, J., Smid, M., Barker, E., Leigh, S., Levenson, M., Vangel, M., Banks, D., Heckert, A., Dray, J. and Vo, S. (2010), "A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications", available at: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-22-rev1a/SP800-22rev1a.pdf>.

9. Vereshchagin, N.K. Uspensky, V.A. and Shen, A. (2013), *Kolmogorov complexity and algorithmic randomness*, Moscow Center for Continuous Mathematical Education, Moscow, 576 p.

10. Hamming, R.W. (1980), *Coding and Information Theory*, Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall, 104 p.

11. Knuth, D.E. (2014), *Art of Computer Programming, Volume 2: Seminumerical Algorithms*, Reading MA, Addison-Wesley Professional, 784 p.

Статтю представив д-р техн. наук. завідувач кафедри НТУ "ХПІ" Семенов С.Г.

Поступила (received) 11.11.2017

Podorozhniak Andrii, Ph.D, associate Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-00-00, e-mail: andpod2@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-6688-8407

Tokarev Marko, student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-00-00, e-mail: tokarevmarko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7689-8556

УДК 519.216:519.246, 004.056.5

Метод генерації псевдовипадкових чисел високої стійкості / Подорожняк А.О., Токарев М.Г. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 36 – 45.

Розглянуто криптостійкі детерміновані генератори псевдовипадкових чисел, джерела випадкових чисел і методи генерації псевдовипадкових чисел з використанням апаратних джерел ентропії. Приведено модифікований авторами метод генерації псевдовипадкових чисел високої стійкості з використанням словника та апаратних джерел ентропії різного фізичного походження. Представлені результати роботи розробленого пристрою для генерації паролів на мікроконтролері, що реалізує запропонований модифікований метод генерації псевдовипадкових чисел. Зроблений порівняльний аналіз отриманих результатів з сучасними загальновідомими методами. Іл.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: криптостійкість, генератор псевдовипадкових чисел, пароль, мікроконтролер.

УДК 519.216:519.246, 004.056.5

Метод генерации псевдослучайных чисел высокой стойкости / Подорожняк А.А., Токарев М.Г. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 36 – 45.

Рассмотрены криптостойкие детерминированные генераторы псевдослучайных чисел, источники случайных чисел и методы генерации псевдослучайных чисел с использованием аппаратных источников энтропии. Приведен модифицированный авторами метод генерации псевдослучайных чисел высокой стойкости с использованием словаря и аппаратных источников энтропии различного физического происхождения. Представлены результаты работы разработанного устройства для генерации паролей на микроконтроллере, реализующем предложенный модифицированный метод генерации псевдослучайных чисел. Сделан сравнительный анализ полученных результатов с современными общеизвестными методами. Ил.: 3. Табл.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: криптостойкость, генератор псевдослучайных чисел, пароль, микроконтроллер.

UDC 519.216:519.246, 004.056.5

The method of generating high crypto pseudo-random numbers / Podorozhniak A.O., Tokarev M.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 50 (1271). – P. 36 – 45.

Cryptographic stability deterministic pseudo-random number generators, random number sources and methods for generating pseudo-random numbers using hardware entropy sources are considered. A modified method for generating high crypto pseudo-random numbers using a dictionary and hardware sources of entropy of various physical origin is presented. The results of the developed device for generating passwords on a microcontroller implementing the proposed modified method for generating pseudo-random numbers are presented. Comparative analysis of the results obtained with modern well-known methods. Figs.: 3. Tabl.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: cryptographic stability, pseudo-random number generator, password, microcontroller

Е.С. РОЕНКО, асс., ДГТУ, Каменское,
А.В. САДОВОЙ, д-р техн. наук., проф., ДГТУ, Каменское

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАЯТНИКА ФУРУТЫ

Управление структурно неустойчивыми объектами с помощью классических методов не позволяет достичь необходимой стабилизации в большом. Использование модели маятника Фуруты, описанного с помощью уравнения Эйлера – Лагранжа второго порядка, позволяет определить нелинейные законы управления, которые обеспечат необходимое качество стабилизации. Полученная модель линеаризованной системы записана в форме, удобной для аналитического конструирования регуляторов. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: структурно неустойчивые объекты; маятник Фуруты; линеаризация; нелинейные законы управления.

Постановка проблемы и анализ литературы. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет синтезировать системы управления высокоточными сложными системами в реальном времени, учитывая множество параметров. Пренебрегая некоторыми из них, невозможно в полной мере оценить адекватность объекта, что может служить источником ошибок при моделировании и создании системы управления. Поэтому работа, устраняющая указанные недостатки, является актуальной.

Синтез систем управления классическими методами не гарантирует устойчивости в большом и может привести к негативным последствиям, в то время как нелинейные законы управления позволяют с достаточной степенью точности управлять маятником подобными системами [1 – 9].

Реальные маятником подобные системы удобно исследовать на прототипах, к которым относятся обратный маятник [1 – 3] и маятник Фуруты [4 – 9]. Эти маятники характеризуются наличием точек неустойчивого и устойчивого равновесия. Причем любое сколь угодно малое внешнее воздействие выводит маятник из положения неустойчивого равновесия и переводит его в положение устойчивого равновесия, в окрестностях которого возникают слабодемпфированные колебания.

Математическое описание известных моделей маятника Фуруты [4, 6 – 9] не содержит информации о силах трения в суставах маятника, что не позволяет в полной мере оценить характер движения и может вносить погрешности при моделировании и синтезе системы

управления. Кроме того, в указанных моделях не учитывается динамика электропривода управляющего маятником.

Цель статьи. Приведение математической модели маятника Фуруты к виду, удобному для синтеза оптимальных управлений путем решения задачи аналитического конструирования регуляторов (АКР).

Математическая модель маятника Фуруты. Маятник Фуруты состоит из руки, которая приводится во вращение в горизонтальной плоскости электродвигателем, и рычага, который вращается в вертикальной плоскости.

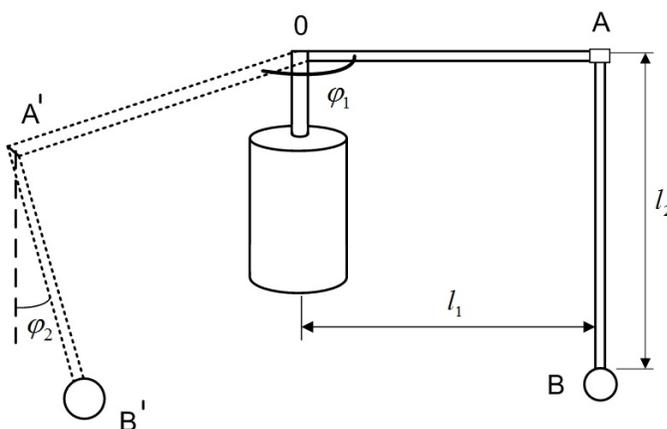


Рис. 1. Маятник Фуруты

Как видно из рис. 1, маятник Фуруты обладает двумя степенями свободы и для описания его динамики удобно использовать уравнение Эйлера-Лагранжа, которое имеет следующий вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \omega_i} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_i} = W, \quad (1)$$

где L – функция Лагранжа; ω_i ($i = 1, 2$) – скорость движения плеча и рычага; $W = M - M_{mp}$ – вектор обобщенных внешних воздействий; φ_i ($i = 1, 2$) – соответствующие углы поворота плеча и рычага.

Для объекта с двумя степенями свободы уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \omega_1} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_1} &= M_{\text{ДВ}} - M_{\text{T}}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \omega_2} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_2} &= -M_{\text{T}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω_1 – скорость движения плеча; φ_1 – угол поворота плеча; $M_{\text{ДВ}}$ – момент развиваемый двигателем; M_{T} – момент трения в суставах; ω_2 – скорость движения рычага; φ_2 – угол поворота рычага.

При составлении функции Лагранжа будем считать что плечо, не обладающее потенциальной энергией, и двигатель связаны между собой абсолютно жестко. Тогда математическое описание маятника Фуруты на основе уравнений (2) может быть найдено в виде [10]:

$$\begin{aligned} (J_{\text{ДВ}} + \frac{1}{3}m_1l_1^2 + m_2l_1^2 + m_3l_1^2 + m_3l_2^2 - m_3l_2^2 \sin^2 \varphi_2) p\omega_1 + \\ + m_3l_1l_2(\omega_2^2 \sin \varphi_2 - p\omega_2 \cos \varphi_2 + 2m_3l_2^2\omega_1\omega_2 \sin 2\varphi_2 + M_{\text{T}} = M_{\text{ДВ}}; \\ p\omega_2(\frac{1}{3}m_2l_2^2 + m_3l_2^2) + p\omega_1m_3l_1l_2 \cos \varphi_2 - \\ - \frac{1}{2}(m_2 + 2m_3)l_2g \sin \varphi_2 - \frac{1}{2}m_3l_2^2\omega_1^2 \sin 2\varphi_2 + M_{\text{T}} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $J_{\text{ДВ}}$ – момент инерции двигателя; m_1 – масса плеча; m_2 – масса рычага; m_3 – масса груза, подвешенного на вершине рычага; l_1 и l_2 – длина плеча и рычага соответственно; $M_{\text{T}} = \frac{R\omega_i}{((R\omega_i/a)^2 + 1)^{0.5}} + C_0\omega_i$;

R – тангенс угла наклона аппроксимированной прямой; C_0 и a – весовые коэффициенты.

Приводной двигатель воздействует на маятник посредством изменения момента на валу, который определяется параметрами двигателя, его скоростью и приложенным напряжением

$$\frac{d}{dt} M_{\text{ДВ}} = -\frac{1}{T_{\text{Я}}} M_{\text{ДВ}} - \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{Я}}T_{\text{Я}}} \omega_1 + \frac{k\Phi}{R_{\text{Я}}T_{\text{Я}}} U_y, \quad (4)$$

где $T_{\text{Я}}$ – постоянная времени якоря; $R_{\text{Я}}$ – сопротивление якоря; $k\Phi$ – конструктивная постоянная двигателя; U_y – управляющее воздействие, подаваемое на двигатель.

В операторном виде система уравнений маятникомодобного электромеханического объекта будет следующей:

$$p\varphi_2 = \omega_2;$$

$$p\omega_2 = \frac{3}{2} \left(-2m_3 l_1 l_2 \cos \varphi_2 p\omega_1 - \frac{1}{2} l_2 g \sin \varphi_2 \cdot \right. \\ \left. \cdot (m_2 + 2m_3) + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 \sin 2\varphi_2 \omega_1^2 - 2M_T \right) / (l_2^2 (m_2 + 3m_3));$$

$$p\varphi_1 = \omega_1; \tag{5}$$

$$p\omega_1 = 3(m_3 l_1 l_2 (\sin \varphi_2 \omega_2^2 - \cos \varphi_2 p\omega_2) - m_3 l_2^2 \sin 2\varphi_2 \omega_1^2 - \\ - M_T + M_{ДВ}) / (3J_{ДВ} + m_1 l_1^2 + 3m_2 l_1^2 + 3m_3 l_1^2 + 3m_3 l_2^2 - m_3 l_2^2 \cos^2 \varphi_2);$$

$$pM_{ДВ} = -\frac{1}{T_{Я}} M_{ДВ} - \frac{(k\Phi)^2}{R_{Я} T_{Я}} \omega_1 + \frac{k\Phi}{R_{Я} T_{Я}} U_{ДВ}.$$

Для упрощення записи уравнений (5) приняты следующие обозначения:

$$A_1 = 3J_{ДВ} + m_1 l_1^2 + 3m_2 l_1^2 + 3m_3 l_1^2 + 3m_3 l_2^2;$$

$$A_2 = m_3 l_2^2; \quad A_3 = m_3 l_1 l_2; \quad A_4 = \frac{R^2}{a^2}; \quad A_5 = m_2 + 3m_3; \tag{6}$$

$$A_6 = gm_2; \quad A_7 = gm_3; \quad A_8 = l_2^2 A_5; \quad A_9 = \frac{C_0}{A_8},$$

с учетом, которых уравнения динамики (5) принимают следующий вид:

$$p\varphi_2 = \omega_2;$$

$$p\omega_2 = \frac{-3A_3 \cos \varphi_2 p\omega_1 - \frac{3l_2 \sin \varphi_2 (A_6 + 2A_7)}{4A_8}}{A_8} + \\ + \frac{A_2 \frac{\sin 2\varphi_2}{2} \omega_1^2}{2A_8} - \frac{R\omega_1}{2A_8 (A_4 \omega_1^2 + 1)^{0.5}} - \frac{1}{2} A_9 \omega_1;$$

$$p\varphi_1 = \omega_1; \tag{7}$$

$$p\omega_1 = \frac{3A_3 (\sin \varphi_2 \omega_2^2 - \cos \varphi_2 p\omega_2)}{A_1 + A_2 \cos^2 \varphi_2} - \frac{A_2 \sin 2\varphi_2 \omega_1 \omega_2}{A_1 + A_2 \cos^2 \varphi_2} + \\ + \frac{M_{ДВ}}{A_1 + A_2 \cos^2 \varphi_2} - \frac{R\omega_1}{(A_1 + A_2 \cos^2 \varphi_2) (A_4 \omega_1^2 + 1)^{0.5}} - \frac{C_0 \omega_1}{A_1 + A_2 \cos^2 \varphi_2};$$

$$pM_{ДВ} = -\frac{1}{T_{Я}} M_{ДВ} - \frac{k\Phi^2}{R_{Я} T_{Я}} \omega_1 + \frac{k\Phi}{R_{Я} T_{Я}} U_{ДВ}.$$

Таким образом разработанная математическая модель учитывает динамику электромеханической системы, состоящей из маятника и приводного двигателя. Эта модель является существенно нелинейной в то время как известные методы решения задачи АКР разработаны для линейных динамических объектов. Поэтому разработанная модель подлежит линеаризации. В настоящей статье рассмотрим простейший случай линеаризации путем разложения правых частей уравнений (7) в ряд Тейлора.

Линеаризация маятника Фуруты. При линеаризации считается, что рычаг находится в вертикальном положении, т.е. ряд Тейлора строится в окрестностях рабочей точки π рад.

Авторами работы [10] доказано, что характер движения маятника Фуруты зависит от угла поворота плеча φ_1 . Поэтому линеаризацию будем выполнять по трем координатам: скорость движения плеча, угол и скорость движения рычага.

Математическая модель (7) в рабочей точке с учетом разложения в ряд Тейлора принимает вид:

$$\begin{aligned}
 p\varphi_2 &= \omega_2; \\
 p\omega_2 &= \frac{-A_3 p\omega_1 + \frac{1}{2} l_2 g (m_2 + 2m_3) \varphi_2 + (R + C_0) \omega_2}{A_8}; \\
 p\varphi_1 &= \omega_1; \\
 p\omega_1 &= \frac{-A_3 p\omega_2 - M_{ДВ} + (R + C_0) \omega_1}{A_1}; \\
 pM_{ДВ} &= -\frac{1}{T_Я} M_{ДВ} - \frac{k\Phi^2}{R_Я T_Я} \omega_1 + \frac{k\Phi}{R_Я T_Я} U_{ДВ}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Линеаризованная модель не имеет нелинейностей типа \sin , \cos и ее переходные процессы показаны на рис. 2. На первых трех графиках показаны изменения ускорения, скорости и угла поворота плеча. Другие три графика демонстрируют колебательное движение рычага.

Для приведения линеаризованной модели (8) к виду удобному для синтеза регулятора необходимо записать уравнения с явно выраженными коэффициентами при переменных:

$$\begin{aligned}
 p\varphi_2 &= b_{12}\omega_2; \\
 p\omega_2 &= b_{21}\varphi_2 + b_{22}\omega_1 + b_{24}\omega_2 - b_{2M}M_{ДВ}; \\
 p\varphi_1 &= b_{32}\omega_1; \\
 p\omega_1 &= b_{41}\varphi_2 + b_{42}\omega_1 + b_{44}\omega_2 - b_{4M}M_{ДВ}; \\
 pM_{Д} &= -\frac{1}{T_{Я}}M_{Д} - \frac{k\Phi^2}{R_{Я}T_{Я}}\omega_1 + \frac{k\Phi}{R_{Я}T_{Я}}U_{ДВ},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где $b_{12}, b_{21}, \dots, b_{44}, b_{4M}$ – постоянные коэффициенты.

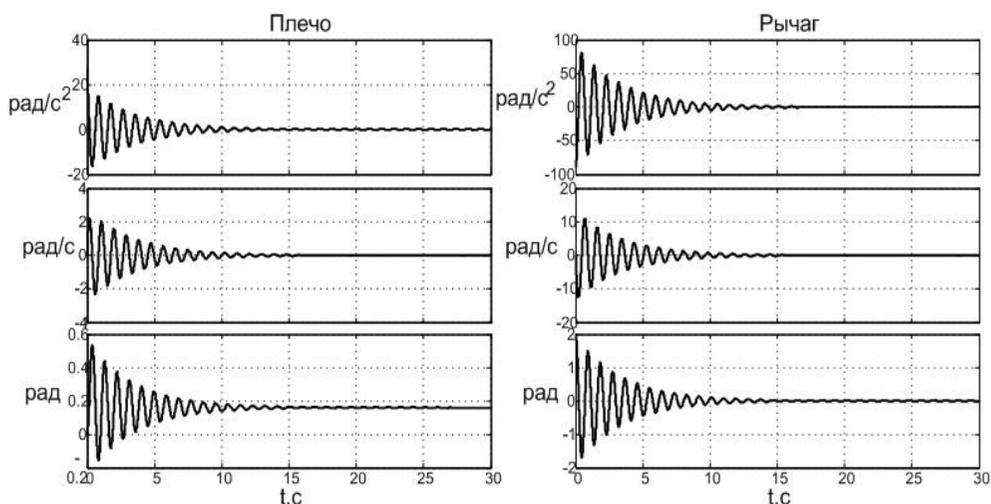


Рис. 2. Переходные процессы линеаризованной системы

Решение задачи АКР осуществляется с помощью уравнений вида

$$pY = BY + MU,
 \tag{10}$$

где Y – вектор фазовых координат маятника Фуруты; B – матрица коэффициентов; M – вектор коэффициентов при управляющих воздействиях; U – вектор управлений.

Для маятника Фуруты имеем:

$$Y = \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \omega_2 \\ \varphi_1 \\ \omega_1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & b_{32} & 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} & 0 & b_{44} \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_{ДВ} \\ 0 \\ -M_{ДВ} \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{2M} \\ 0 \\ b_{4M} \end{bmatrix}.$$

Выводы. В работе получена математическая модель маятника Фуруты, которая учитывает характер движения его трех элементов: плеча, рычага и приводного двигателя. Полученные уравнения линеаризованной системы (8) представлены в нормальной форме и могут быть использованы для синтеза оптимального регулятора путем решения задачи АКР. В отличие от исходной нелинейной системы линеаризованная система является двухканальной и управление можно осуществлять одновременно углом поворота плеча и рычага.

Список литературы: 1. *Aracil J.* Kinetic energy shaping in the inverted pendulum / *J. Aracil, J.A. Acosta, F. Gordillo* // *IFAC Nonlinear Control Systems*, Stuttgart. – Germany. – 2004. – P. 1063-1067. 2. *Wachinger C.* Simulation of the inverted pendulum / *C. Wachinger, M. Pock*. – Munchen, 2004. – 33 p. 3. *Aracil J.* A controller for swinging-up and stabilizing the inverted pendulum / *J. Aracil, J.A. Acosta, F. Gordillo* // *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control* Seoul, Korea, July 6-11, 2008. – P. 7695-7699. 4. *Arnolds M.B.* Identification and control of the Rotary Inverted Pendulum / *M.B. Arnolds* // *TU e Traineeship Report*. – 2003. – 55 p. 5. *Cazzolato B.S.* On the dynamics of the Furuta pendulum / *B.S. Cazzolato; Z. Prime* // *Journal of Control Science and Engineering*, 2011. – Article ID 528341. – 8 p. 6. *Kats C.J.A.* Nonlinear control of a Furuta rotary inverted pendulum / *C.J.A. van Kats* // *TU/e Bachelor Final Project Report*. – 2004. – Vol. 2004.069. – Technische Universiteit Eindhoven. – 23 p. 7. *Akesson J.* Safe manual control of the Furuta pendulum / *J. Akesson, K.J. Astrom* // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications*. – 2001. – (CCA '01). – IEEE–Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001. – P. 890-895. 8. *Acosta J.A.* Swing up the Furuta pendulum by the speed gradient method / *J.A. Acosta, F. Cordillo, J. Aracil* // *European Control Conference (ECC)*. – 2001 – 7 p. 9. *Ling K.V.* Robust predictive control of the Furuta Pendulum / *K.V. Ling, P. Falugi, J.M. Maciejowski, L. Chisci* // *15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*. – Barcelona, 2002. – 13 p. 10. *Роєнко Ю.* Уточнення рівнянь динаміки маятника Фурути / *Ю. Роєнко, Р. Волянський, О. Садовой* // *Engineering mechanics & transport*, Lviv Polytechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua>, 2013. – P. 98-101,

References:

1. Aracil, J., Acosta, J.A., and Gordillo, F. (2004), "Kinetic energy shaping in the inverted pendulum", *IFAC Nonlinear Control Systems*, Stuttgart. Germany, 2004, pp. 1063-1067.
2. Wachinger, C., and Pock, M. (2004), *Simulation of the inverted pendulum*, Munchen, 33 p.
3. Aracil, J., Acosta, J.A., and Gordillo, F. (2008), "A controller for swinging-up and stabilizing the inverted pendulum", *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp. 7695-7699.
4. Arnolds, M.B. (2003), "Identification and control of the Rotary Inverted Pendulum". *TU/ e Traineeship Report*, 2003, 55 p.
5. Cazzolato, B.S., and Prime, Z. (2011), "On the dynamics of the Furuta pendulum". *Journal of Control Science and Engineering*, Article ID 528341, 8 p.
6. Kats, C.J.A. (2004), "Nonlinear control of a Furuta rotary inverted pendulum". *TU/e Bachelor Final Project Report*, Vol, 2004.069, Technische Universiteit Eindhoven, 23 p.

7. Akesson, J., and Astrom, K.J., (2001), "Safe manual control of the Furuta pendulum", *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications*. (CCA '01). IEEE--Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001, pp. 890-895.
8. Acosta, J.A., Acosta, J.A., and Gordillo, F. (2001), "Swing up the Furuta pendulum by the speed gradient method", *European Control Conference (ECC)*, 7 p.
9. Ling, K.V., Falugi, P., Maciejowski, J.M., and Chisci, L. (2002), "Robust predictive control of the Furuta Pendulum", *15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Barcelona, 13 p.
10. Roenko, E. Volianskij, R., and Sadovoy, O. (2013), "Clarifying the dynamics equations of the Furuta pendulum", *Engineering mechanics & transport*, Lviv Polytechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua>, pp. 98-101.

Статью представил д-р техн. наук. заведуючий кафедри електротехники и електромеханики Дніпровського державного технічного університету Низимов В.Б.

Поступила (received) 11.08.2017

Roenko Efim, Assistant
Dneprovskiy state technical university
Dneprostroevska street, 2, city Kamenskoe, Ukraine, 51918
Tel.: +38 098 2223015 E-mail: efim.mail@gmail.com

Sadovoy Oleksandr, Dr. Sci. Tech., Professor
Dneprovskiy state technical university
Dneprostroevska street, 2, city Kamenskoe, Ukraine, 51918
Tel.: +38 067 7791248 E-mail: sadovoyav@ukr.net

УДК 519.7+681.5

Лінеаризація математичної моделі маятника Фурути / Рощко Ю.С., Садовой О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 46 – 54.

Керування структурно нестійкими об'єктами за допомогою класичних методів не дозволяє досягти необхідної стійкості у великому. Використання моделі маятника Фурути, описаного за допомогою рівняння Ейлера – Лагранжа другого порядку, дозволяє вивести нелінійні закони керування, які забезпечать необхідну якість стабілізації. Отримана модель лінеаризованої системи записана у зручній формі для аналітичного конструювання регуляторів. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: структурно нестійкі об'єкти, маятник Фурути, лінеаризація, нелінійні закони керування.

УДК 519.7+681.5

Линеаризация математической модели маятника Фуруты / Рощко Ю.С., Садовой А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 46 – 54.

Управление структурно неустойчивыми объектами с помощью классических методов не позволяет достичь необходимой стабилизации в большом. Использование модели маятника Фуруты, описанного с помощью уравнения Эйлера – Лагранжа второго порядка, позволяет определить нелинейные законы управления, которые обеспечат необходимое качество стабилизации. Полученная модель линеаризованной системы записана в форме, удобной для аналитического конструирования регуляторов. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: структурно неустойчивые объекты, маятник Фуруты, линеаризация, нелинейные законы управления.

UDC 519.7+681.5

Linearization of the mathematical model of the Furuta pendulum / Roenko E.S., Sadovoy O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 46 – 54.

Managing structurally unstable objects using classical methods does not achieve the required stability. Using the Furuta pendulum model described by the second-order Euler-Lagrange equation allows us to derive non-linear control laws that will provide the required stabilization quality. The obtained model of the linearized system is written down in a convenient form for the analytical design of the controllers. Figs.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: structurally unstable objects, Furuta pendulum, linearization, nonlinear control laws.

І.С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, доц., проф., СНУ
ім. В. Даля, Северодонецьк,
М.О. ГРУШКА, магістр, СНУ ім. В. Даля, Северодонецьк,
Л.В. БАРБАРУК, ст. викл., СНУ ім. В. Даля, Северодонецьк

ПІДХОДИ ДО ЕФЕКТИВНОГО СПРОЩЕННЯ І ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ВЕЛИКИХ НАБОРІВ ДАНИХ

Розглянуто проблеми візуалізації послідовностей великих наборів даних. Задачу пошуку оптимального відображення даних сформульовано у вигляді задачі вибору алгоритму спрощення простих полігональних ланцюгів з мінімальною кількістю помилок. Виконано аналіз ефективності алгоритмів Рамера-Дугласа-Пекера, Реумана-Віткама, Опхейма, Ланга, алгоритму виключення за висотою трикутника та алгоритму радіального виключення точок при роботі з великими даними. Наводяться результати порівняння та оцінки ефективності їх використання для аналізу реальних даних, що збираються в системах локомотивної безпеки. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: візуалізація; великі набори даних; алгоритм спрощення; полігональний ланцюг; система локомотивної безпеки.

Вступ. Стан будь-якого технологічного об'єкта, що оснащений датчиками, з яких постійно знімається інформація, може бути описаний послідовностями їх значень, які, у свою чергу, відображаються точками, лініями, кривими або поверхнями. Графічне відображення – дуже простий та дієвий спосіб представлення даних, що дозволяє полегшити їх сприйняття та надає достатньо інформації для аналізу і прийняття рішень [1]. Візуалізація даних має важливе значення для вивчення та розуміння структур та моделей даних, їх залежностей та виявлення незвичних спостережень. Необхідність бачити дані неможливо перебільшити. Однак наявність великої кількості доступних даних суттєво впливає на вибір засобів і технології їх відображення [2]. Використання традиційних методів візуалізації для послідовностей великих наборів різноманітних даних приводить до втрати інформативності й може створити на екрані одну велику пляму, що складається з множини точок, які представляють кожен рядок даних. Зрозуміло, що таке відображення унеможливує подальший аналіз та інтерпретацію даних. Інша проблема полягає в тому, що дані надходять з різних джерел. Хоча вони можуть охоплювати аналогічний діапазон дат, різні набори даних можуть мати різні інтервали між записаними значеннями. Нарешті, поряд з природою даних, їх обсяги та вимоги до швидкості обробки постійно зростають, і це стає класичною проблемою Big Data. Для того, щоб успішно аналізувати такі типи даних, їх необхідно спростити для графічного відображення, що вимагає пошуку

і використання нових підходів та принципів обробки. Це дасть змогу дослідити менший розмірний простір і виявити цікаві структури та незвичні спостереження.

У цій статті головний акцент зроблено на розгляді проблем візуалізації даних у вигляді полігональних ланцюгів та результатах роботи з великими наборами даних.

Огляд проблем спрощення полігональних ланцюгів. Полігональний, або багатокутний ланцюг P в евклідовій площині визначається як упорядкований список вершин $\langle p_1, p_2, \dots, p_n \rangle$, при якому будь-які дві послідовні вершини з'єднуються лінійним сегментом.

У загальному виді проблема спрощення полігональних ланцюгів [3] формулюється наступним чином. Нехай дана полігональна крива $\langle p_1, \dots, p_n \rangle$ і крива $P' = \langle p_{i_1}, \dots, p_{i_k} \rangle$ з $1 = i_1 < \dots < i_k = n$, що спрощує криву P , де $P(i, j)$ це відрізок шляху з p_i до p_j . Для пари індексів $1 \leq i \leq j \leq n$, $\delta_F(p_i p_j, P)$ позначає помилку спрощення сегмента $p_i p_j$ відносно $P(i, j)$. Тоді,

$$\delta_F(P', P) = \max_{1 \leq j \leq k} \delta_F(p_i p_{j+1}, P), \quad (1)$$

де P' є ε -спрощенням P , якщо $\delta_F(P', P) \leq \varepsilon$.

Проблема оптимізації відображення даних може бути сформульована у вигляді задачі вибору алгоритму спрощення простих полігональних ланцюгів, а саме: Для наданої полігональної кривої P , необхідно знайти спрощення P' з мінімальною кількістю вершин. В літературі [3, 4] ця проблема розглядається головним чином як задача ε -або $\#$ -мінімізації.

Проблема ε -мінімізації. Для наданого полігонального ланцюга P і цілого числа $k \leq n$, знайти серед усіх апроксимацій P з не більше ніж k вершинами апроксимацію з мінімальною погрішністю.

Проблема $\#$ -мінімізації. Для наданого полігонального ланцюга P і дійсного числа $\varepsilon \geq 0$, знайти серед усіх ε -апроксимацій P ε -апроксимацію з мінімальною кількістю вершин.

Надалі в роботі розглянуто проблему ε -мінімізації.

Спрощення полігональних ланцюгів. Суть алгоритмів спрощення полігональних ланцюгів полягає у зменшенні кількості точок шляхом видалення тривіальних точок, але без порушення істотної форми вихідної лінії. Перше застосування з 1960 р. алгоритми спрощення полігональних ланцюгів набули у картографії [5, 6] з подальшим поширенням на географічні інформаційні системи, комп'ютерну графіку, візуалізацію часових рядів [7, 8], проблеми

стиснення даних, тощо. Нині більшість навігаційних додатків використовують методи і алгоритми спрощення ліній для зменшення об'єму карт та поліпшення швидкості виконання таких операцій як масштабування та прокрутка. Розроблені й протестовані різноманітні алгоритми спрощення, наприклад, алгоритм Дугласа-Пекера [9], що спрощує лінію на основі вертикального інтервалу; алгоритм Реумана-Віткама [10], що спрощує лінію на основі функцій кутового повороту [11]; алгоритм послідовного спрощення лінії [12], що спрощує лінію на основі області та інші, однак, як зазначається в [13], питання вибору алгоритму та оцінка ефективності залишається відкритою.

Ключовим моментом у використанні алгоритмів спрощення полігональних ланцюгів є вибір порогу, що визначає силу спрощення. Саме від цього параметру залежить кількість точок та вид отриманої лінії.

У різних алгоритмах поріг спрощення визначається по-різному. Найпоширеніші варіації порогу спрощення:

- Відстань від точки до лінії, утвореної сусідніми або крайніми точками.
- Радіус, в межах якого видаляються усі точки
- Номер точки: видаляється кожна N точка.
- Площа, в межах якої залишається лише зазначена кількість точок.

Чим більшим є поріг спрощення тим менше рівень деталізації отриманої лінії та тим менше точок складають отриману лінію. На рис. 1 показано полігональний ланцюг, що складається з 13 вершин: $\{p_1, p_2, \dots, p_{13}\}$ та приклад спрощення при $k = 3$, що містить вершини: $\{p_1, p_6, p_9, p_{13}\}$.

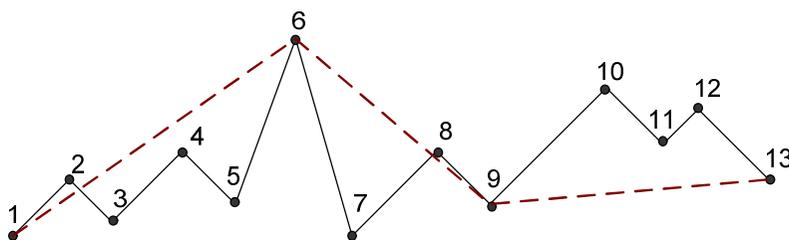


Рис. 1. Приклад полігонального ланцюга та його спрощення

Різноманіття варіацій порогу спрощення призводить до необхідності детального аналізу характеру вхідних даних. Задача математичного обмеження алгоритмів спрощення полігональних ланцюгів є найбільш складною. Недоопрацьоване застосування процесу спрощення ліній, імовірно, не зможе значно зменшити розмір ланцюга.

Натомість надмірна спрощена лінія може призвести до спотворення його відображення. Погано підібраний поріг спрощення може призвести до втрати значущих даних та нашттовхнути людину, що аналізує візуалізовані дані, до хибних висновків. Таким чином, обов'язковими кроками є розрахунок порогу спрощення і вибір показників для визначення якості.

Метою роботи є обґрунтування вибору методів та алгоритмів спрощення полігональних ланцюгів, які лежать в основі системи візуалізації великих наборів технологічних даних. Найкращий алгоритм має забезпечити візуальне відображення даних у різних масштабах зі збереженням їх точності.

Розрахунок сили спрощення полігонального ланцюга. Рівень деталізації спрощеної лінії тісно пов'язаний з порогом спрощення відповідного алгоритму. Поріг асоціюється із силою спрощення. Для вимірювання сили спрощення зазвичай використовують алгоритм знаходження середньої відстані зсуву.

Для отримання знаходження сили спрощення у класичному випадку використовується формула [14]

$$D_{simpl} = SR_p \cdot N, \quad (2)$$

де SR_p – просторова розподільна здатність пікселя; N – мінімальна кількість пікселів, що зможе розрізнити людське око на певній відстані від монітора.

Просторова розподільна здатність являє собою число незалежних пікселів значень на дюйм. Цей показник головним чином впливає на здатність ока людини розрізнити деталі на лінії й обчислюється наступним чином

$$SR_p = \frac{D_p}{PPI \cdot Scale}, \quad (3)$$

де D_p – фізичний розмір пікселя $D_p = \frac{1}{PPI}$, $Scale$ – масштаб PPI – кількість пікселів на дюйм

$$PPI = \frac{\sqrt{H_r^2 + V_r^2}}{D_s}, \quad (4)$$

де D_s – розмір дисплея, $H_r \times V_r$ – розподільна здатність дисплея.

Для реалізації можливості зміни пропорцій графіків відносно один одного до формули (2) додамо співвідношення поточної висоти

компоненти відображення графіків (H) до висоти графіка, для якого виконується обчислення (H_{plot})

$$D_{simpl} = SR_p \cdot N \cdot \frac{H}{H_{plot}}. \quad (5)$$

Оцінка якості спрощення полігональних ланцюгів. Зрозуміло, що спрощення полігонального ланцюга змінює його форму. Чим вище ступінь спрощення, тим більше спрощений ланцюг відрізняється від оригінального. Для оцінки застосовності алгоритмів спрощення до мети роботи необхідно розрахувати позиційні помилки. Спосіб вимірювання похибки спрощення полягає в знаходженні відстаней між вихідними точками, що були спрощені, та спрощеним ланцюгом.

Найбільш часто використовуваними показниками для визначення якості спрощення є [15]:

– максимальне відхилення (максимальна відстань від оригінальної точки, що була спрощена, до спрощеної лінії)

$$\max_{i=1, N} (p_i - p_i^m); \quad (6)$$

– мінімальне відхилення (максимальна відстань від оригінальної точки, що була спрощена, до спрощеної лінії)

$$\min_{i=1, N} (p_i - p_i^m); \quad (7)$$

– середньоквадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - p_i^m)^2}{N}}; \quad (8)$$

– сума відхилень (сума відстаней від оригінальних точок, що були спрощені, до спрощеної лінії)

$$S = \sum_{i=1}^N (p_i - p_i^m). \quad (9)$$

Дослідження алгоритмів спрощення на практичному прикладі. Описані вище положення використовуються для реалізації завдання з формування та візуалізації послідовностей великих наборів даних систем локомотивної безпеки, призначених для забезпечення безпеки руху в поїзній і маневровій роботі.

В системах локомотивної безпеки, що організовані за допомогою сучасних високотехнологічних пристроїв, використовуються датчики й устаткування для автостопного і службового гальмування; обладнання

для приймання та обробки вхідної інформації та формування керуючих команд; операторське обладнання; сервісне та діагностичне обладнання; блоки живлення. Багато вимірювань, такі як, наприклад, значення автоматичної локомотивної сигналізації безперервної дії (АЛСБ), збираються з частотою 50, 100 або 150 Гц. Для аналізу архівних даних, діагностики і визначення причин несправностей та аварійних ситуацій необхідно мати можливість відображення усіх параметрів, в залежності від типу, на чотирьох графіках: (1) дискретні параметри, (2) аналогові параметри, (3) параметри швидкості та обмеження, (4) сигнал світлофору та об'єкти з електронної карти. По осі x має бути відображені дата і час з точністю до секунди та значення лінійної координати у кілометр-пикетах. По осі y – значення відповідного параметра у заданій величині. Необхідно також надати можливість перегляду даних за максимально можливою за тривалістю поїздки, що складає 3 доби.

Для пошуку найкращого алгоритму спрощення та забезпечення якісної візуалізації послідовностей наявних даних було обрано 6 алгоритмів: Дугласа-Рамера-Пекера (ДРП), Реумана-Віткама (Р-В), Опхейма, Ланга, алгоритм виключення за висотою трикутника (ВТ) та алгоритм радіального виключення точок (Рад). Порівняння ефективності алгоритмів спрощення складалося з двох етапів: візуального аналізу та розрахунку похибок. Візуальний аналіз використовувався для оцінки відтворюваності, тобто наскільки спрощений ланцюг передає поведінку (форму) початкового ланцюга. Математичний аналіз дозволив обрати з поміж алгоритмів, що однаково добре пройшли візуальний аналіз, алгоритм з найменшим значенням позиційної похибки.

Для тестування алгоритмів спрощення було обрано значення середньо-квадратичного відхилення сигналу АЛСБ. Результати спрощення надано на рис. 2.

Для порівняння обраних алгоритмів спрощення полігональних ланцюгів виконано обчислення позиційних похибок. Значення похибок обчислювались по формулам (6) – (9) окремо для кожної точки. Результати обчислення похибок спрощення ланцюгів різними алгоритмами надані у табл.

Координати точок на рис. 2: по осі X – дата і час в мілісекундах з початку епохи (1970), по осі Y – значення середньоквадратичного відхилення сигналу АЛСБ. Загальний проміжок – 10 секунд. На верхньому графіку кожного рисунку позначений оригінальний ланцюг. На нижньому графіку кожного рисунку позначено спрощений ланцюг. Початкова кількість точок 15425.

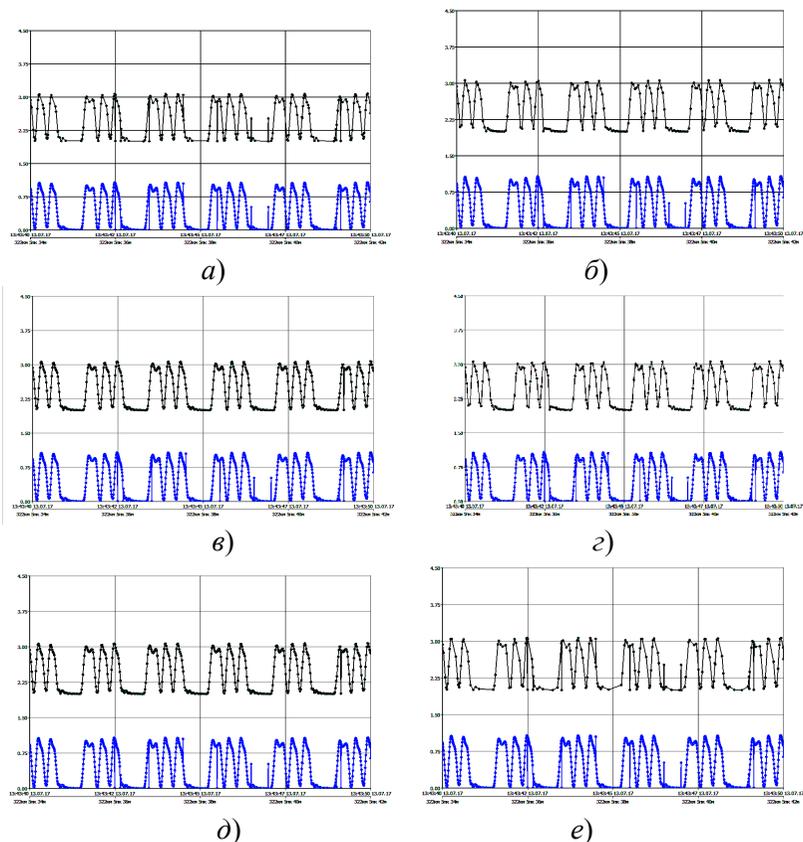


Рис. 2. Результат спрощення алгоритмами (а) Дугласа-Рамера-Пекера, (б) радіального виключення точок, (в) виключення за висотою трикутника, (г) Ланга, (д) Опхейма, (е) Реумана-Віткама

Таблиця

Результати обчислення похибок

Алгоритм	ДРП	Рад	ВТ	Ланг	Опхейм	Р-В
Показник						
Максимальна похибка	0.022	1.062	1.064	1.062	1.064	0.127
Середня похибка	0.005	0.023	0.008	0.023	0.008	0.018
Середньо-квадратична похибка	0.005	0.069	0.064	0.069	0.066	0.019
Сума похибок	82.08	352.09	129.49	356.01	128.89	285.63
Кількість точок після спрощення	3856	3090	7713	3086	7726	2867

В результаті роботи, враховуючи вимоги забезпечення найменшої похибки, найбільш оптимальним алгоритмом для спрощення точок сигналу АЛСБ є алгоритм Дугласа-Рамера-Пекера.

Висновки. Обґрунтовано вибір алгоритму спрощення візуального відображення великих наборів даних для використання в діагностичному програмному комплексі системи локомотивної безпеки. Вибір оптимального алгоритму проведено з урахуванням розрахунків порогу спрощення і показників якості спрощення. Розрахунки проводилися з урахуванням характеристик дисплею. У рамках поставленої задачі, баланс між вимогами до деталізації вихідного зображення та отриманням мінімальної кількості точок був зсунутий у бік зменшення сили спрощення та збільшення деталізації.

Результати роботи дозволили вирішити частину багатоетапного завдання з розробки підсистеми адаптивної візуалізації архівних даних систем локомотивної безпеки. Наступним кроком реалізації проекту є вирішення проблеми пошуку і виділення послідовностей даних, що найменше схожі на інші, або дисонансів часових рядів, рішення задачі виявлення цікавих структур та незвичних спостережень в наборах великих даних.

Список літератури: 1. *Gorodov E.Yu.* Analytical Review of Data Visualization Methods in Application to Big Data / *E.Yu. Gorodov, V.V. Gubarev* // Journal of Electrical and Computing Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – P. 201-207. 2. *Hyndman R.J.* Visualization of big time series data [Електронний ресурс] / *R.J. Hyndman*. – Режим доступу: www.robjhyndman.com/seminars/big-time-series/ – 21.10.2017 р. 3. *Agarwal P.K.* Efficient Algorithms for Approximating Polygonal Chains / *P.K. Agarwal, K.R. Varadarajan* // Discrete Computing Geometry. – 2000. – Vol. 23. – P. 273-291. 4. *Buzer L.* Optimal simplification of polygonal chains for subpixel-accurate rendering / *L. Buzer* // Computing Geometry Theory Application. – 2009. – Vol. 42 (1). – P. 45-59. 5. *Buttenfield B.* Treatment of the cartographic line / *B. Buttenfield* // Cartographica. – 1985. – Vol. 22. – P. 1-26. 6. *McMaster R.B.* Automated line generalization / *R.B. McMaster* // Cartographica. – 1987. – Vol. 24 (2). – P. 74-111. 7. *Kumar N.* Time-series bitmaps: a practical visualization tool for working with large time series databases / *N. Kumar, N. Lolla, E. Keogh et al.* // Proceedings of the 5th SIAM International Conference on Data Mining, Newport Beach, California, April 2005. – P. 531-535. 8. *Lin J.* Visually mining and monitoring massive time series / *J. Lin, E. Keogh, S. Lonardi, et al.* // Proceedings of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2005. – P. 460-469. 9. *Douglas D.H.* Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature / *D.H. Douglas, T.K. Peucker* // The Canadian Cartographer. – 1973. – Vol. 10. – №. 2. – P. 112-122. 10. *Reumann K.* Optimizing curve segmentation in computer graphics / *K. Reumann, A.P.M. Witkam* // Proceedings of the International Computing Symposium, Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1974. – P. 467-472. 11. *Rangayyan R.M.* Polygonal approximation of contours based on the turning angle function / *R.M. Rangayyan, D. Guliato, J.D. de Carvalho, S. Santiago* // Journal of Electronic Imaging. – 2008. – Vol. 17 (2). – P. 16-23. 12. *Qingsheng G.* A progressive line simplification algorithm / *G. Qingsheng, C. Brandenberger, L. Hurni* // Geo-Spatial Information Science. – 2002. – Vol. 5 (3). – P. 41-45. 13. *Shi W.* Performance Evaluation of Line Simplification Algorithms

for Vector Generalization / *W. Shi, CK. Cheung* // *The Cartographic Journal*. – 2006. – Vol. 43. – №. 1. – P. 27-44. **14.** *Song J.* A Novel Evaluation Approach for Line Simplification Algorithms towards Vector Map Visualization / *J. Song, R. Miao* // *International Journal of Geo-Informatics*. – 2016. – Vol. 5. – P. 223. **15.** *Ekdemir S.* Efficient Implementation of Polyline Simplification for Large Datasets and Usability Evaluation [Електронний ресурс] / *S. Ekdemir* – Режим доступу: [www. URL: www.diva-portal.org/smash/ get/diva2:444686/FULLTEXT01.pdf](http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444686/FULLTEXT01.pdf) – 21.10.2017 р.

References:

1. Gorodov, E.Yu. and Gubarev, V.V. (2013), "Analytical Review of Data Visualization Methods in Application to Big Data", *Journal of Electrical and Computing Engineering*, Vol. 2013, pp. 201-207.
2. Hyndman, R.J. (2015), "Visualization of big time series data, available at: URL <https://robjhyndman.com/seminars/big-time-series/> (accessed 21 October 2017)
3. Agarwal, P. K. and Varadarajan, K. R. (2000), "Efficient Algorithms for Approximating Polygonal Chains", *Discrete Computing Geometry*, Vol. 23, pp. 273-291.
4. Buzer, L. (2009), "Optimal simplification of polygonal chains for subpixel-accurate rendering", *Computing Geometry Theory Application*, Vol. 42 (1), pp. 45-59.
5. Buttenfield, B. (1985), "Treatment of the cartographic line", *Cartographica*, Vol. 22, pp. 1-26.
6. McMaster, R.B. (1987), "Automated line generalization", *Cartographica*, Vol. 24 (2), pp. 74-111.
7. Kumar, N., Lolla, N., Keogh, E., et al. (2005), "Time-series bitmaps: a practical visualization tool for working with large time series databases", *Proceedings of the 5th SIAM International Conference on Data Mining, Newport Beach, California, April 2005*, pp 531-535.
8. Lin, J., Keogh, E., Lonardi, S., et al. (2004), "Visually mining and monitoring massive time series", *Proceedings of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp 460-469.
9. Douglas, D.H. and Peucker, T.K. (1973), "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature", *The Canadian Cartographer*, Vol 10, No. 2, pp. 112-122.
10. Reumann, K. and Witkam, A.P.M. (1974), "Optimizing curve segmentation in computer graphics", *Proceedings of the International Computing Symposium*, Amsterdam, North-Holland Publishing Company, pp. 467-472.
11. Rangayyan, R.M., Guliato, D., de Carvalho, J.D. and Santiago, S. (2008), "Polygonal approximation of contours based on the turning angle function", *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 17 (2), pp. 16-23.
12. Qingsheng, G., Brandenberger, C. and Hurni, L. (2002), "A progressive line simplification algorithm", *Geo-Spatial Information Science*, Vol. 5 (3), pp. 41-45.
13. Shi, W., and Cheung, CK. (2006), "Performance Evaluation of Line Simplification Algorithms for Vector Generalization", *The Cartographic Journal*, Vol. 43 No. 1, pp. 27-44.
14. Song, J. and Miao, R. (2016), "A Novel Evaluation Approach for Line Simplification Algorithms towards Vector Map Visualization", *International Journal of Geo-Informatics*, Vol. 5, pp. 223.

15. Ekdemir, S. "Efficient Implementation of Polyline Simplification for Large Datasets and Usability Evaluation", available at: URL www.diva-portal.org/smash/get/diva2:444686/FULLTEXT01.pdf (accessed 21 October 2017).

Статтю представив д-р техн. наук., проф. НТУ "ХПІ" Леонов С.Ю.

Надійшла (received) 01.12.2017

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

Grushka Mykhailo, Magistr
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
59-a Central Avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
Tel.: (064) 522-89-97, e-mail: mikkgru@yahoo.com
ORCID ID: 0000-0003-4145-1425

Barbaruk Lina, Senior Lecturer
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
59-a Central Avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
Tel.: (064) 522-89-97, e-mail: barbaruk.angelina@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-6639-3001

УДК 004.922

Підходи до ефективного спрощення та візуалізації великих наборів даних / Скарга-Бандурова І.С., Грушка М.О., Барбарук Л.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 55 – 65.

Розглянуто проблеми візуалізації послідовностей великих наборів даних. Задачу пошуку оптимального відображення даних сформульовано у вигляді задачі вибору алгоритму спрощення простих полігональних ланцюгів з мінімальною кількістю помилок. Виконано аналіз ефективності алгоритмів Рамера-Дугласа-Пекера, Реумана-Віткама, Опхейма, Ланга, алгоритму виключення за висотою трикутника та алгоритму радіального виключення точок при роботі з великими даними. Наводяться результати порівняння та оцінки ефективності їх використання для аналізу реальних даних, що збираються в системах локомотивної безпеки. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: візуалізація; великі набори даних; алгоритм спрощення; полігональний ланцюг; система локомотивної безпеки.

УДК 004.922

Подходы к эффективному упрощению и визуализации больших наборов данных / Скарга-Бандурова И.С., Грушка М.О., Барбарук Л.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 55 – 65.

Рассмотрены проблемы визуализации последовательностей больших наборов данных. Задача поиска оптимального отображения данных сформулирована в виде задачи выбора алгоритма упрощения простых полигональных цепей с минимальным количеством ошибок. Выполнен анализ эффективности алгоритмов Рамера-Дугласа-Пэкера, Реумана-Виткама, Опхейма, Ланга, алгоритма исключения по высоте треугольника и алгоритма радиального исключения точек при работе с большими данными. Приведены результаты сравнения и оценки эффективности их использования для анализа реальных данных, собираемых в системах локомотивной безопасности. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: визуализация; большие наборы данных; алгоритм упрощения; полигональная цепь; система локомотивной безопасности.

UDC 004.922

Approaches for Efficient Simplification of Large Datasets / Skarga-Bandurova I.S., Grushka M.O., Barbaruk L.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 55 – 65.

The problems of visualization of sequences of large data sets are considered. The task of finding an optimal data mapping is formulated in the form of selecting the best algorithm for simplification of simple polygonal circuits with a minimum number of errors. The analysis of the efficiency of variation of Ramer-Douglas-Packer algorithm, Reumann-Whitcom algorithm, Opheim algorithm, Lang simplification algorithm, the triangle exclusion algorithm and the radial exclusion algorithm for large data sets are performed. The results of comparison and estimation of their efficiency for the analysis of real data collected in systems of locomotive safety are presented. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 15 titles.

Keywords: visualization; large data sets; simplification algorithm; polygonal circuits; system of locomotive safety.

Б.А. ХУДАЯРОВ, д-р техн. наук, проф., Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Узбекистан

Ф.Ж. ТУРАЕВ, асс., Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Узбекистан

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПРУГОГО ОСНОВАНИЯ ГРУНТА

В работе решается задача о колебаниях прямолинейных участков трубопровода на базе теории оболочек. Построена математическая модель о параметрических колебаниях вязкоупругих трубопроводов большого диаметра с протекающей пульсирующей жидкостью. Разработан вычислительный алгоритм, основанный на исключении особенностей интегральных и интегро-дифференциальных уравнений с сингулярными ядрами, с последующим использованием квадратурных формул, для решения задач динамики вязкоупругих трубопроводов с протекающей пульсирующей жидкостью. Численно исследовано влияние сингулярности в ядрах наследственности и частоты возбуждения на колебания конструкций, обладающих вязкоупругими свойствами. Ил.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: математическая модель; вязкоупругий трубопровод; интегро-дифференциальные уравнения; численное исследование; пульсирующая жидкость.

Постановка проблемы и анализ литературы. Проблема обеспечения высокопрочными трубами для строительства и эксплуатации мощностей по добыче и транспортировке нефти и газа является одной из первоочередных государственных задач. Решение ее начинается с формулировки требований к качеству труб, связанных с повышением надежности и долговечности трубопроводного транспорта. Одним из путей решения этой проблемы является использование в нефтегазовой отрасли труб из различных материалов, в том числе полимеросодержащих [1].

Как известно, магистральные, технологические и промышленные газонефтепроводы представляют собой сложные инженерные конструкции, проложенные во многих республик и регионах СНГ и эксплуатируемые в разнообразнейших природно-климатических условиях. Следует отметить, что подземная, наземная и подводные прокладки трубопроводов, подводные переходы, различные электрохимзащиты от коррозии, особенности технологии строительства и конструктивных решений создают широкий спектр параметров прочности, устойчивости различных участков трубопроводов. В

© Б.А. Хадаяров, Ф.Ж. Тураев, 2017

настоящее время при строительстве магистральных трубопроводов широко применяются трубы, изготовленные из различных естественных и искусственных (композитных) материалов. При сложных климатических условиях от проектировщика и расчетчика требуется максимально правильно оценить свойства материала трубы и реального грунта [2].

Задача исследования колебаний трубопровода на упругом и вязкоупругом основании с протекающей в нем жидкостью является весьма сложной. На сегодняшний день разработано множество подходов для решения подобных задач, но ни один из них не дает качественно полного решения задачи гидроупругости в трубопроводной системе в целом. В основном эти подходы описывают отдельные стадии процессов, происходящих в газо-нефтепроводе [3, 4].

Широкое использование новых композиционных материалов в объектах нефтегазовой промышленности, в объектах химического производства, а также других отраслях машиностроения требует дальнейшего совершенствования механических моделей деформируемых тел и разработки методов и методики их расчета с учетом вязкоупругих свойств материала тонкостенных конструкций.

Таким образом, несомненный научный и практический интерес вызывает построение математических моделей, позволяющих исследовать динамические процессы вязкоупругих трубопроводов с протекающей газо-жидкостью с учетом вязкоупругого основания грунта.

Необходимо не только создание математической модели, но и численного алгоритма и компьютерной программы для решения задачи о свободных колебаниях вязкоупругих тонкостенных трубопроводов с учетом вязкоупругого основания грунта.

Рассмотрим поведение трубопровода типа цилиндрической оболочки, внутри которой протекает пульсирующая жидкость. Скорость жидкости $U(t)$ изменяется по закону [5].

Уравнения движения оболочки, полученные в рамках классической теории оболочек [5], с учетом наличия вязкоупругого основания, имеют вид:

$$\begin{aligned} (1-R^*) \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + L_1(w) \right\} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ (1-R^*) \left\{ \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + L_2(w) \right\} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \quad (1) \\ D(1-R^*) \nabla^4 w + L_3^*(u, v, w) + k_1(1-\Gamma^*)w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= q, \end{aligned}$$

где R^* – интегральный оператор вида: $R^* \varphi(t) = \int_0^t R(t-\tau)\varphi(\tau)d\tau$;
 $R(t-\tau)$ – ядро релаксации; R – радиус кривизны срединной поверхности; μ – коэффициент Пуассона материала трубы; D – цилиндрическая жесткость трубы; E – модуль упругости материала трубы; ρ – его плотность; k_1 – коэффициент основания Винклера; h – толщина стенки трубы; μ_1 – параметр возбуждения; γ_1 – частота возбуждения; операторы $L_1(w)$, $L_2(w)$ и $L_3^*(u, v, w)$ определены такими:

$$L_1(w) = -\frac{\mu}{R} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1+\mu}{2R^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} + \frac{1-\mu}{2R^2} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2},$$

$$L_2(w) = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} + \frac{1-\mu}{2R} \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2},$$

$$L_3^*(u, v, w) = (1-R^*) \frac{Eh}{1-\mu^2} \left\{ -\frac{\mu}{R} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R^2} - \frac{\mu}{2R} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \right.$$

$$\left. -\frac{1}{R^3} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right\} - \frac{Eh}{1-\mu^2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} (1-R^*) \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\mu}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{\mu w}{R} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1-\mu}{2R} \frac{\partial w}{\partial \theta} (1-R^*) \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} -$$

$$-\frac{Eh}{1-\mu^2} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \theta} (1-R^*) \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{R} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial w}{\partial x} (1-R^*) \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\},$$

q – давление жидкости на стенку трубопровода

$$q = -\Phi_{\alpha m}^* \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + U^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right),$$

где $\varphi_{\alpha m}^* \rho$ – присоединенная масса жидкости; m – число волн, образующихся по окружности; α – волновое число или постоянная распространения фазы.

Решение систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений (ИДУ) в частных производных (1) при различных граничных условиях и при наличии сингулярных ядер наследственности представляет собой значительные математические трудности. Поэтому естественным способом решения этих систем является дискретизация по пространственным переменным и получение системы нелинейных ИДУ относительно функций времени.

В связи с этим **целью статьи** является разработка численного метода, позволяющего исследовать влияние геометрических нелинейностей и вязкоупругих свойств материала на колебательные процессы вязкоупругих трубопроводов.

Будем искать приближенное решение системы (1) в виде:

$$\begin{aligned} u(x, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{nm}(t) \cos \frac{n\pi x}{L} \sin m\theta, \\ v(x, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M v_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \cos m\theta, \\ w(x, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \sin m\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_{nm}(t)$, $v_{nm}(t)$ и $w_{nm}(t)$ – неизвестные функции времени.

Подставляя (2) в систему (1) и применяя метод Бубнова-Галёркина, получим систему интегро-дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} &u_{kl} + (1 - R^*) \left\{ \left(k^2 \pi^2 \delta^2 \gamma^2 + \frac{1 - \mu}{2} l^2 \delta^2 \right) u_{kl} - \frac{1 - \mu}{2} kl \pi \gamma \delta^2 v_{kl} + \right. \\ &+ \mu \delta^2 \gamma^2 k \pi w_{kl} + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left(\frac{ni^2 \pi^2}{2} \gamma^3 \delta + \frac{1 - \mu}{2} \frac{nr^2}{2} \gamma \delta \right) \Delta_{1klmnr} w_{nm} w_{ir} - \\ &\left. - \frac{1 + \mu}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{imr}{2} \gamma \delta \Delta_{2klmnr} w_{nm} w_{ir} \right\} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

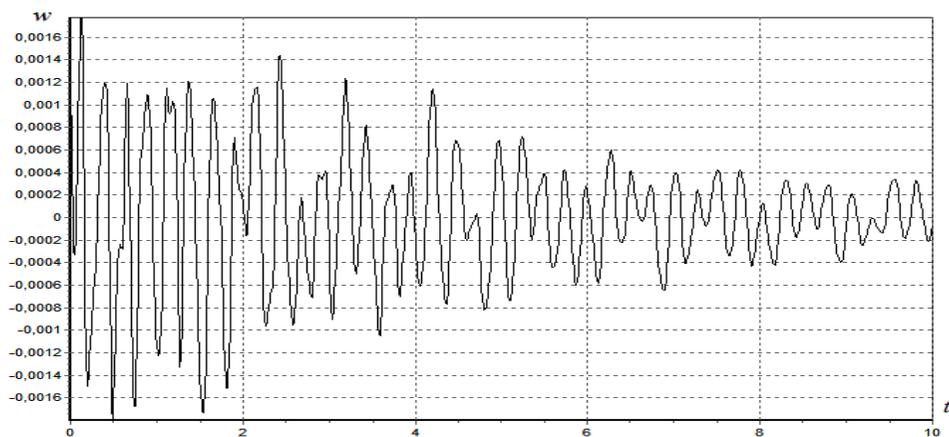
$$\begin{aligned}
 & v_{kl} + (1 - R^*) \left\{ \left(\frac{1 - \mu}{2} k^2 \pi^2 \delta^2 \gamma^2 + l^2 \delta^2 \right) v_{kl} - \frac{1 + \mu}{2} kl \pi \gamma \delta^2 u_{kl} - l \delta^2 w_{kl} - \right. \\
 & - \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{mr^2}{2\pi} \delta \bar{\Delta}_{3klmnr} w_{nm} w_{ir} + \frac{1 + \mu}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{inr\pi}{2} \gamma^2 \delta \bar{\Delta}_{4klmnr} w_{nm} w_{ir} - \\
 & \left. - \frac{1 - \mu}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{i^2 m \pi}{2} \gamma^2 \bar{\Delta}_{3klmnr} w_{nm} w_{ir} \right\} = 0, \\
 & (1 + \varphi_{\alpha l}^*) w_{kl} + (1 - R^*) \left\{ \left(\frac{1}{12} [k^2 \pi^2 \gamma^2 + l^2]^2 + \delta^2 \right) w_{kl} + \pi \mu \gamma \delta^2 k u_{kl} - \right. \\
 & - l \delta^2 v_{kl} - \frac{\delta}{4\pi} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M mr \bar{\Delta}_{5klmnr} w_{nm} w_{ir} - \frac{\pi \mu \gamma^2 \delta}{4} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M ni \bar{\Delta}_{6klmnr} w_{nm} w_{ir} \left. \right\} + \\
 & + \frac{1 - \mu}{4} \gamma \delta \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n w_{nm} (1 - R^*) \left[\gamma \pi i r v_{ir} - r^2 u_{ir} \right] \bar{\Delta}_{6klmnr} + \\
 & + \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m w_{nm} (1 - R^*) \left[i r \mu \gamma u_{ir} - \frac{r^2}{\pi} v_{ir} + \frac{r}{\pi} w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{5klmnr} + \quad (3) \\
 & + \frac{1 - \mu}{4} \delta \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m w_{nm} (1 - R^*) \left[i r \gamma u_{ir} - \gamma^2 i^2 \pi v_{ir} \right] \bar{\Delta}_{5klmnr} - \\
 & - \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n w_{nm} (1 - R^*) \left[i r \mu \gamma^2 \pi v_{ir} - i^2 \gamma^3 \pi^2 v_{ir} - \mu \pi i \gamma^2 w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{6klmnr} - \\
 & - \frac{1 - \mu}{4} \delta \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n m w_{nm} (1 - R^*) \left[r \gamma u_{ir} - i \gamma^2 \pi v_{ir} \right] \bar{\Delta}_{7klmnr} - \\
 & - \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m^2 w_{nm} (1 - R^*) \left[i \mu \gamma v_{ir} - \frac{r}{\pi} v_{ir} + \frac{1}{\pi} w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{8klmnr} - \\
 & - \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n^2 w_{nm} (1 - R^*) \left[i \gamma^3 \pi^2 u_{ir} - \mu r \gamma^2 \pi v_{ir} + \mu \gamma^2 \pi w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{8klmnr} -
 \end{aligned}$$

$$-\delta^2 M^{*2} \gamma^2 M_E^2 k^2 \pi^2 w_{kl} + \delta^4 k_1 (1 - \Gamma^*) w = 0.$$

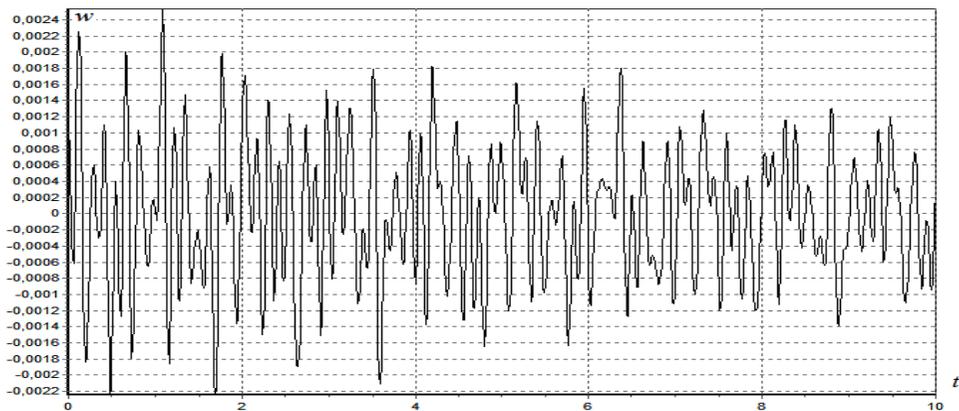
$$u_{nm}(0) = u_{0nm}, \quad \dot{u}_{nm}(0) = \dot{u}_{0nm}, \quad v_{nm}(0) = v_{0nm}, \quad (3)$$

$$\dot{v}_{nm}(0) = \dot{v}_{0nm}, \quad w_{nm}(0) = v_{0nm}, \quad \dot{w}_{nm}(0) = \dot{w}_{0nm}.$$

Решение ИДУ (3) находится численным методом, основанным на использовании квадратурных формул [6 – 9]. Результаты вычислений, отражаются графиками, приведенными на рис. 1 и рис. 2, где показано влияние параметра γ_1 на колебательный процесс при $A = 0,01$; $\alpha = 0,25$; $\beta = 0,005$; $\delta = 10$; $N = 5$; $M = 2$. Из рисунков видно, что увеличение значения частоты возбуждения приводит к увеличению амплитуды и частоты колебаний.



а)



б)

Рис. 1. Зависимость прогиба от времени при $\gamma = 75$ Гц (а), $\gamma_1 = 150$ Гц (б).

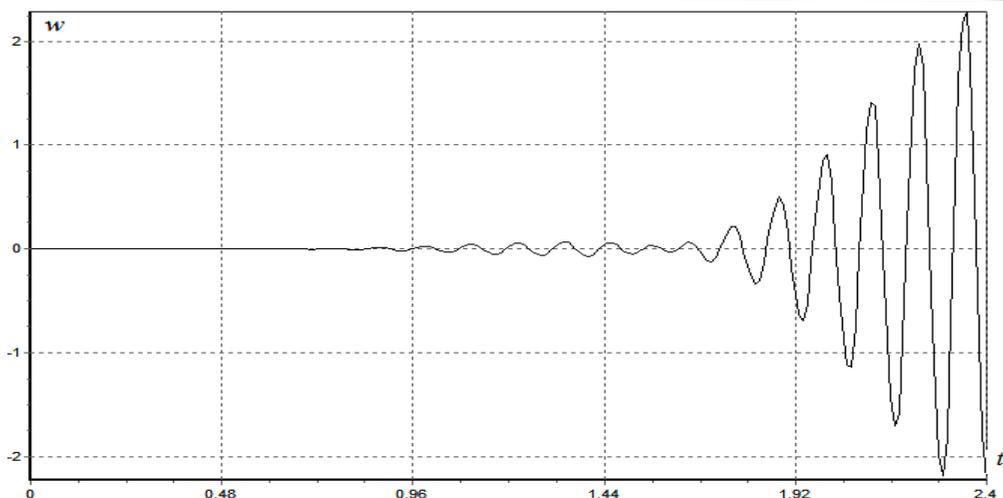


Рис. 2. Зависимость прогиба от времени при $\gamma_1 = 250$ Гц

Здесь $\delta = \frac{R}{h}$, $\gamma = \frac{R}{L}$, $M^* = \frac{U}{V_\infty}$, $M_E = \sqrt{\frac{E}{\rho V_\infty^2}}$, V_∞ – скорость звука, $\bar{\Delta}_{jklmnr}$ ($j = 1, \dots, 8$) – безразмерные коэффициенты.

Выводы. Необходимо отметить, что алгоритм предлагаемого метода позволяет детально исследовать влияние геометрических нелинейностей и вязкоупругих свойств материала конструкций на колебательные процессы вязкоупругих трубопроводов, в частности, при исследовании свободных и параметрических колебаний трубопроводов на базе теории идеально-упругих оболочек.

Список литературы: 1. Якубовская С.В. Явление ползучести и релаксации армированных полиэтиленовых трубопроводов / С.В. Якубовская, Н.Ю. Сильницкая, Е.Ю. Иванова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 1676-1680. 2. Гаджиев В.Дж. Свободное колебание прямоугольного участка неоднородного трубопровода, лежащего на двухконстантном основании / В.Дж. Гаджиев, С.Р. Расулова, Х.Г. Джафаров // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 4. – С. 137-141. 3. Vincent O. S. Olunloyo. Dynamic Response Interaction of Vibrating Offshore Pipeline on Moving Seabed / O.S. Olunloyo Vincent, A. Osheku Charles and A. Oyediran Ayo // Journal Offshore Mech. Arct. Eng. – 2006. – Vol. 129 (2). – P. 107-119. 4. Limarchenko V.O. Vibration of a pipeline with liquid under combined vibration perturbations / V.O. Limarchenko // Journal of mathematical sciences. – 2014. – Vol. 201. №. 3. – P. 105-125. 5. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи гидроупругости / А.С. Вольмир. – М.: Наука. 1979. – 320 с. 6. Бадалов Ф.Б. Методы решения интегральных и интегро-дифференциальных уравнений наследственной теории вязкоупругости / Ф.Б. Бадалов. – Ташкент: Мехнат, 1987. – 269 с. 7. Бадалов Ф.Б. О некоторых методах решения систем интегро-дифференциальных уравнений, встречающихся в задачах вязкоупругости / Ф.Б. Бадалов, Х. Эшматов,

М. Юсупов // Прикладная математика и механика. – 1987. – Т. 51. – № 5. – С. 867-871.
8. Худаяров Б.А. Нелинейный флаттер вязкоупругих отротропных цилиндрических панелей / Б.А. Худаяров, Н.Г.Бандурин // Математическое моделирование. – 2005. – Том 17. – № 10. – С. 79-86. 9. Бадалов Ф.Б. Исследование влияния ядра наследственности на решение линейных и нелинейных динамических задач наследственно-деформируемых систем / Ф.Б. Бадалов, Б.А. Худаяров, А. Абдукаримов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 4. – С. 107-110.

References:

1. Yakubovskaya, S.V., Silnitsky, N.Yu., and Ivanova, E.Yu. (2015), "The Phenomenon of creep and relaxation of reinforced polyethylene pipes", *Fundamental research*, No. 2, pp. 1676-1680.
2. Hajiyev, V.J., Rasulov, S.R., and Jafarov, Kh.G. (2015) "Free oscillation of a rectangular plot of heterogeneous pipeline, lying on the two constant basis", *Oil and gas business*, Vol. 13, No. 4, pp.137-141.
3. Vincent, O.S. Olunloyo, Charles A. Osheku, and Ayo, A. Oyediran. (2006) "Dynamic Response Interaction of Vibrating Offshore Pipeline on Moving Seabed", *Journal Offshore Mech. Arct. Eng.*, No. 129(2), pp. 107-119.
4. Limarchenko, V.O. (2014) "Vibration of a pipeline with liquid under combined vibration perturbations", *Journal of mathematical sciences*, Vol. 201, No. 3, pp. 105-125.
5. Volmir, A.S. (1979), *Shells in the flow of liquid and gas. Problems of hydroelasticity*, Science, Moscow, 320 p.
6. Badalov, F.B. (1987) *Methods of solution of integral and integro-differential equations of hereditary theory of viscoelasticity*, Mexnat, Tashkent, 269 p.
7. Badalov F.B., Eshmatov H., and Yusupov M. (1987) "About some methods for solving systems of integro-differential equations encountered in problems of viscoelasticity" *Journal of Applied mathematics and mechanics*, Vol. 51, No. 5, pp. 867-871.
8. Khudayarov B.A., Bandurin N.G. (2005), "Nonlinear flutter of viscoelastic cylindrical panels urotropine", *Mathematical modeling*, Vol.17, No. 10, pp. 79-86.
9. Badalov F.B., Khudayarov B.A., Abduraimov A. (2007), "Study of the influence of the kernel of heredity on the solution of linear and nonlinear dynamic problems hereditary-deformable systems", *Problems of mechanical engineering and reliability of machines*, No. 4, pp. 107-110.

Статью представил д-р физ.-мат. наук, проф. Наримов Н.

Поступила (received) 10.11.2017

Khudayarov Bakhtiyar, Dr. Sci. Tech, Prof.
Tashkent Institute of Agricultural Irrigation and Mechanization,
Str. Kari-Niyazov, 39, Tashkent, Uzbekistan, 050010,
Tel: +99897-721-07-14, e-mail: bakht-flpo@yandex.com

Тураев Ф.Ж., ass.
Tashkent Institute of Agricultural Irrigation and Mechanization,
Str. Kari-Niyazov, 39, Tashkent, Uzbekistan, 050010,
Tel: +99897-721-07-14, e-mail: bakht-flpo@yandex.com

УДК 539.3

Чисельне дослідження коливань трубопроводів з урахуванням в'язкопружного підстави ґрунту / Худаяров Б.А., Тураєв Ф.Ж. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 66 – 74.

Вирішується задача про коливання прямолінійних ділянок трубопроводу на базі теорії оболонки. Побудовано математичну модель про параметричні коливання в'язкопружних трубопроводів великого діаметру з протікаючою пульсуючою рідиною. Розроблено обчислювальний алгоритм, заснований на виключенні особливостей інтегральних та інтегро-диференціальних рівнянь з сингулярними ядрами, з подальшим використанням квадратурних формул, для вирішення завдань динаміки в'язкопружних трубопроводів. Чисельно досліджені вплив сингулярності в ядрах спадковості і частоти збудження на коливання конструкцій, що володіють в'язкопружні властивостями. Іл.:2. Бібліогр.: 9 назв.

Ключевые слова: математична модель; в'язкопружний трубопровід; інтегро-диференціальні рівняння; чисельне дослідження; пульсуюча рідина.

УДК 539.3

Численное исследование колебаний трубопроводов с учетом вязкоупругого основания грунта / Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 66 – 74.

Решается задача о колебаниях прямолинейных участков трубопровода на базе теории оболочек. Построена математическая модель о параметрических колебаниях вязкоупругих трубопроводов большого диаметра с протекающей пульсирующей жидкостью. Разработан вычислительный алгоритм, основанный на исключении особенностей интегральных и интегро-дифференциальных уравнений с сингулярными ядрами, с последующим использованием квадратурных формул, для решения задач динамики вязкоупругих трубопроводов. Численно исследовано влияние сингулярности в ядрах наследственности и частоты возбуждения на колебания конструкций, обладающих вязкоупругими свойствами. Ил.:2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: математическая модель; вязкоупругий трубопровод; интегро-дифференциальные уравнения; численное исследование; пульсирующая жидкость.

UDC 539.3

Numerical study of the vibrations of pipelines taking into account the viscoelastic base of the soil / Khudayarov B.A., Turaev F.Dg. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 50 (1271). – P. 66 – 74.

The problem of oscillations of rectilinear pipeline sections based on shell theory is solved. A mathematical model of the problem of parametric oscillations of viscoelastic large diameter pipelines with a flowing pulsating fluid is constructed. A computational algorithm based on eliminating the singularities of integral and integro-differential equations with singular kernels was developed, followed by the use of quadrature formulas, to solve the problems of the dynamics of viscoelastic pipelines with a flowing pulsating liquid. The influence of singularity in the heredity nuclei and the frequency of excitation on the vibrations of structures possessing viscoelastic properties are numerically investigated. Figs.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: mathematical model; viscoelastic pipelines; integro-differential equations; numerical investigation; pulsating fluid.

Т.Г. ЭРГАШЕВ, канд.физ.-мат.наук, доц., Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, г. Ташкент, Узбекистан

ФОРМУЛА ОБРАЩЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЛЬТЕРРА С ФУНКЦИЕЙ ГУМБЕРТА В ЯДРЕ И ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЯ К РЕШЕНИЮ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

Многие задачи прикладной математики сводятся к решению интегральных уравнений со специальными функциями в ядрах, поэтому формулы обращения таких уравнений играют важную роль при решении различных задач. В работе введена и рассмотрена вырожденная гипергеометрическая функция от двух переменных, через которую выражается решение исследуемого интегрального уравнения Вольтерра первого рода. Найденная формула обращения применена к нахождению некоторых соотношений между искомым решением и его производной краевой задачи для гиперболического уравнения с двумя линиями вырождения и со спектральным параметром. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: интегральное уравнение Вольтерра первого рода; формула обращения; вырожденная гипергеометрическая функция от двух переменных; спектральный параметр.

Постановка проблемы и анализ литературы. Многочисленные приложения теории интегральных уравнений можно найти в теории упругости, в теории пластичности, гидродинамике, в теории массо- и теплопереноса, теории управления, химических технологиях, биомеханике, теории массового обслуживания, экономике и медицине. Часто изучение задач моделирования фильтрации жидкости в пористых средах сводится к рассмотрению интегральных уравнений Вольтера первого рода со специальными функциями в ядрах [1, 2]. Из общей теории известно, что если при решении задач прикладной математики появляется интегральное уравнение Вольтера первого рода, то необходимо найти формулу обращения, выражающую решение интегрального уравнения в явном виде. Подробное изложение теории интегральных уравнений первого рода и библиографию можно найти в [3, 4]. Опуская большой список литературы, в которой изучены различные интегральные уравнения первого рода, отметим работы, наиболее близко примыкающие к настоящему сообщению.

В задаче Коши для гиперболического уравнения с двумя линиями вырождения и со спектральным параметром

$$(-y)^m U_{xx} - x^n U_{yy} + \mu x^n (-y)^m U = 0, \quad x > 0, y < 0, \quad (1)$$

где m, n и μ – действительные числа, при нахождении соотношения между искомым решением и его производной на линии вырождения, т.е. соотношения между $\tau(x) \equiv U(x, 0)$ и $v(x) \equiv U'_y(x, 0)$, приходим к следующему интегральному уравнению:

$$N_{0x}^\lambda[v(x)] \equiv \int_0^x \left(\frac{t}{x}\right)^\alpha (x-t)^{-2\beta} \times \\ \times \Xi_2\left(\alpha, 1-\alpha; 1-\beta; -\frac{(x-t)^2}{4xt}, \lambda(x-t)^2\right) v(t) dt, \quad (2)$$

где $\Xi_2(a, b; d; u, w) = \sum_{m, n=0}^{\infty} \frac{(a)_m (b)_m}{m! n! (d)_{m+n}} u^m w^n$ – функция Гумберта, $(a)_k$ – символ Похгаммера: $(a)_0 = 1$, $(a)_k = a(a+1)\dots(a+k-1)$, $k = 1, 2, \dots$ а α , β и λ – действительные числа, причем

$$\alpha = \frac{n}{2(n+2)}, \quad \beta = \frac{m}{2(m+2)}, \quad \lambda = \frac{1}{4}\mu.$$

Нетрудно заметить, что при $0 \leq n < 1$ и $0 < m < 1$ параметры α и β принимают положительные значения $0 \leq 2\alpha < 1$ и $0 < 2\beta < 1$, а при $-1 < n \leq 0$ и $-1 < m < 0$ – отрицательные значения $-1 < 2\alpha \leq 0$ и $-1 < 2\beta < 0$, соответственно.

При $\alpha = 0$ и $\lambda = 0$ получим общеизвестное и досконально изученное интегральное уравнение типа Абеля с отрицательным параметром β в виде [3 – 5]

$$\int_0^x (x-t)^{-2\beta} dt = \tau(x).$$

При $\alpha = 0$ уравнение (2) принимает вид

$$\int_0^x (x-t)^{-2\beta} \bar{J}_{-\beta}[\lambda(x-t)] v(t) dt = \tau(x).$$

Это уравнение называется уравнением Вольтерра первого рода с функциями Бесселя в ядрах и оно исследовано многими авторами [3 – 5].

В случае, когда $\lambda = 0$, формула обращения интегрального уравнения с гипергеометрической функцией в ядре

$$\int_0^x (x-t)^{-2\beta} F\left(\alpha, 1-\alpha; 1-\beta; -\frac{(x-t)^2}{4xt}\right) t^\alpha v(t) dt = x^\alpha \tau(x)$$

получена в [6, 7].

Многие задачи для уравнений гиперболического типа первого рода с двумя линиями вырождения и со спектральным параметром сводятся к решению интегрального уравнения (2) с неотрицательными параметрами ($0 \leq 2\alpha < 2\beta < 1$, λ – произвольное число) [8].

Исследованию интегрального уравнения (2) при отрицательных значениях параметров α и β посвящены сравнительно мало работ. Когда $-1 < 2\beta < 2\alpha \leq 0$ и $\lambda = 0$, отметим лишь работу [9].

При $-1 < n \leq 0$ и $-1 < m < 0$ для уравнения (1) прямая $y = 0$ параболического вырождения является особой характеристикой – огибающей обоих семейств характеристик. В зависимости от степеней вырождения m и n предельные значения $\tau(x)$ и $v(x)$ могут иметь особенности. Чтобы обеспечить необходимую гладкость решения $U(x, y)$ вне линии характеристического вырождения, необходимо требовать повышенную гладкость функций $\tau(x)$ и $v(x)$. С целью ослабить это требование в [10] дано определение и изучены свойства так называемого класса $R_2^\lambda(\alpha, \beta)$ обобщенных решений уравнения (1), который при $\alpha = 0$ и $\lambda = 0$ совпадает с классом R_2 , введенным и изученным И.Л. Каролем [11]. Кроме того, в [10] на основе известной формулы классического решения задачи Коши [12] для уравнения (1) получен явный вид обобщенного решения этой же задачи в нововведенном классе.

К такому направлению исследований примыкают работы [13, 14].

Целью данного исследования является решение интегрального уравнения (2) при $-1 < 2\beta < 2\alpha \leq 0$ и при любых значениях λ и применение полученную формулу обращения к нахождению некоторых соотношений между $\tau(x)$ и $v(x)$.

Вырожденные гипергеометрические функции от двух переменных. Нет необходимости говорить о важности свойств гипергеометрических функций. Любой исследователь, имеющий дело с практическими применениями дифференциальных или интегральных уравнений с ними встречается. Решение самых разных задач, относящихся к теплопроводности и динамике, электромагнитным

колебаниям и аэродинамике, квантовой механике и теории потенциалов, приводит к изучению гипергеометрических функций.

Разнообразие задач, приводящих к гипергеометрическим функциям, вызвало быстрый рост их числа. Например, в монографии [15] определены области сходимости гипергеометрических функций от трех переменных второго порядка.

В настоящем сообщении мы имеем дело с вырожденными гипергеометрическими функциями от двух переменных. В [15] они определены следующим образом

$$F_{l,m;n}^{p,q;k} \left[\begin{matrix} (a_p); & (b_q); & (c_k); \\ (\alpha_l); & (\beta_m); & (\gamma_n); \end{matrix} ; x, y \right] = \sum_{r,s=0}^{\infty} \frac{\prod_{j=1}^p (a_j)_{r+s} \prod_{j=1}^q (b_j)_r \prod_{j=1}^k (c_j)_s}{\prod_{j=1}^l (\alpha_j)_{r+s} \prod_{j=1}^m (\beta_j)_r \prod_{j=1}^n (\gamma_j)_s} \frac{x^r y^s}{r! s!},$$

где $\prod_{j=1}^i (d_j)_t = (d_1)_t (d_2)_t \dots (d_i)_t$. Область сходимости функции $F_{l,m;n}^{p,q;k}$

известна:

$$p + q < l + m + 1, p + k < l + n + 1, |x| < \infty, |y| < \infty$$

или

$$p + q > l + m + 1, p + k > l + n + 1, |x| < 1, |y| < 1,$$

и

$$|x|^{\frac{1}{p-1}} + |y|^{\frac{1}{p-1}} < 1, \text{ если } p > l; \max\{|x|, |y|\} < 1, \text{ если } p < l.$$

В дальнейшем решение интегрального уравнения (2) будет выражаться с помощью функции

$$F_{1;0;1}^{0;2;1} \left[\begin{matrix} -; & b, c; & d; \\ e; & -; & g; \end{matrix} ; x, y \right] = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{(b)_m (c)_m (d)_n}{(e)_{m+n} (g)_n} \frac{x^m y^n}{m! n!}.$$

Поэтому опишем некоторые свойства этой функции.

Легко видеть, что функция $F_{1;0;1}^{0;2;1}$ является естественным обобщением известной функции Гумберта Ξ_2 , т.е. имеет место равенство

$$F_{1;0;1}^{0;2;1} \left[\begin{matrix} -; & b, c; & d; \\ e; & -; & d; \end{matrix} ; x, y \right] = \Xi_2(b, c; e; x, y).$$

По методу, изложенному в [16], можно выяснить, что функции Ξ_2 и $F_{1;0;1}^{0;2;1}$ являются вырожденными гипергеометрическими функциями второго и третьего порядков [16], соответственно. Известно [16], что функция Гумберта $z = \Xi_2(b, c; e; x, y)$ удовлетворяет систему уравнений

$$\begin{cases} x(1-x)z_{xx} + yz_{xy} + [e - (b+c+1)x]z_x - bcz = 0, \\ yz_{yy} + xz_{xy} + ez_y - z = 0. \end{cases}$$

Далее, следуя работе [16], нетрудно установить, что функция

$$z = F_{1;0;1}^{0;2;1} \left[\begin{matrix} - : b, c; & d; \\ e : & - ; & d; \end{matrix} x, y \right]$$

является решением следующей системы уравнений

$$\begin{cases} x(1-x)z_{xx} + yz_{xy} + [e - (b+c+1)x]z_x - bcz = 0, \\ y^2 z_{yyy} + xyz_{xyy} + gxz_{xy} + (e+g+1)yz_{yy} + (eg-y)z_y - dz = 0. \end{cases}$$

Взглянув на эти системы уравнений, легко понять, что порядок вырожденной гипергеометрической функции от двух переменных определяется наивысшим порядком частных производных входящих в данную систему.

Формула обращения интегрального уравнения (2). Имеет место следующая

Теорема. Пусть $v(x)$ – непрерывна и интегрируема в интервале $(0, 1)$, $\tau(x) \in C[0,1] \cup C^1(0,1)$ и $\tau(0) = 0$. Тогда при $-1 < 2\beta < 2\alpha \leq 0$ и при любых λ интегральное уравнение (2) обратимо по формуле

$$v(x) = T_{0x}^{\alpha,\beta,\lambda} [\tau(x)] \equiv \frac{\sin 2\beta\pi}{2\beta\pi} x^{-2\alpha} \frac{d}{dx} \left\{ x^\alpha \int_0^x t^\alpha (x-t)^{2\beta} \times \right. \\ \left. \times F_{1;0;1}^{0;2;1} \left[\begin{matrix} - : -\alpha, 1+\alpha; & \frac{1}{2} + \beta; \\ 1+\beta : & - ; & -\frac{1}{2} + \beta; \end{matrix} -\frac{(x-t)^2}{4xt}, \lambda(x-t)^2 \right] \tau'(t) dt \right\}, \quad (3)$$

и наоборот, т.е. справедливы тождества

$$T_{0x}^{\alpha,\beta,\lambda} \{ N_{0x}^{\alpha,\beta,\lambda} [v(x)] \} = v(x), \quad N_{0x}^{\alpha,\beta,\lambda} \{ T_{0x}^{\alpha,\beta,\lambda} [\tau(x)] \} = \tau(x). \quad (4)$$

Доказательство теоремы осуществим для первого из тождеств (4). Из (2) имеем

$$\begin{aligned} \tau'(t) = & -\beta t^{-\alpha-1} \int_0^t (t-s)^{-2\beta} \Xi_2(\alpha, 1-\alpha; -\beta; u, w) s^\alpha v(s) ds - \\ & - 2\beta t^{-\alpha-1} \int_0^t (t-s)^{-2\beta-1} \Xi_2(\alpha, 1-\alpha; -\beta; u, w) s^{\alpha+1} v(s) ds - \\ & - (\alpha + \beta) t^{-\alpha-1} \int_0^t (t-s)^{-2\beta} F_{1;0;1}^{0;2;1} \left[\begin{matrix} - & : & \alpha, 1-\alpha; & 1-\alpha-\beta; \\ 1-\beta & : & - & -\alpha-\beta; \end{matrix} ; u, w \right] s^\alpha v(s) ds, \end{aligned}$$

где $u = -(t-s)^2 / (4ts)$, $w = -\lambda(t-s)^2$.

Подставив теперь найденное выражение для $\tau'(t)$ в (3), после ряда несложных преобразований получим

$$v(x) = x^{-2\alpha} \frac{d}{dx} \left\{ x^\alpha \int_0^x W(x, d; \lambda) s^\alpha v(s) ds \right\}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} W(x, s; \lambda) = & \sum_{k, n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+n}}{k!n!} \left(\beta - \frac{1}{2} \right)_k \left(\frac{1}{2} - \beta \right)_n \Omega(k, n; z) [\lambda(x-s)^2]^{k+n}, \\ \Omega(k, n; z) = & \sum_{p, q=0}^{\infty} \frac{(-1)^{p+q} (-\alpha)_p (1+\alpha)_p (\alpha)_q (1-\alpha)_q}{p!q!(1+2k+2n+2p+2q)!} \times \\ & \times \left(\frac{1}{2} + \beta + k \right)_p \left(\frac{1}{2} - \beta + n \right)_q z^{2p+q} (1-z)^{-q} E(k, n; p, q; z), \\ E(k, n; p, q; z) = & (-\alpha - 2\beta + 2n + q) z F(2 + 2k + 2n + 2p + 2q; z) + \\ & + (1 + 2k + 2n + 2p + 2q) (1-z) F(1 + 2k + 2n + 2p + 2q; z), \quad z = (x-s) / x. \end{aligned}$$

Здесь для краткости принята запись

$$F(d; z) = F(1 + 2\beta + 2k + 2p, 1 + p + q; d; z),$$

где $F(a, b; d; u)$ – гипергеометрическая функция Гаусса.

Продолжение доказательства теоремы существенно опирается на свойства функции $W(x, s; \lambda)$. Выделим следующее утверждение в виде леммы, доказательство которой приведем после доказательства теоремы.

Лемма. При любых λ и $0 < s < x < 1$ справедливо тождество

$$W(x, s; \lambda) = (1 - z)^\alpha. \quad (6)$$

Теперь в продолжении доказательства теоремы, если учитывать, что $W(x, s; \lambda) = (s/x)^\alpha$, то соотношение (5) превращается в тождество. Тем самым доказано первое из тождеств (3). Аналогично доказывается и второе тождество. Теорема доказана.

Доказательство леммы. Пусть $\lambda = 0$. Тогда $W(x, s; 0) = \Omega(0, 0; z)$. Применяя известную формулу

$$(1 - z)^{-q} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(q)_m}{m!} z^m,$$

получим

$$\Omega(0, 0; z) = \sum_{p, q, m, l=0}^{\infty} A(p, q, m, l) z^{2p+q+m+l} + \sum_{p, q, m, l=0}^{\infty} B(p, q, m, l) z^{1+2p+q+m+l},$$

где A и B – известные функции от p, q, m и l . Нетрудно установить равенство:

$$\sum_{p, q, m, l=0}^{\infty} A(p, q, m, l) z^{2p+q+m+l} = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{[p/2]} \sum_{m=0}^{p-2q} \sum_{l=0}^{p-2q-m} A(q, m, p-2q-k-l, l) z^p,$$

где $[p]$ – целая часть числа p . Используя это равенство и свойства символа Похгаммера, затем приведя подобные члены по степеням z , после нескольких преобразований получим

$$W(x, s; 0) = (1 - z)^\alpha. \quad (7)$$

При наличии λ , т.е. при $\lambda \neq 0$, следует учитывать, что

$$W(x, s; \lambda) = \sum_{k, n=0}^{\infty} (-1)^k \Omega_1(k; z) [\lambda(x-s)^2]^k,$$

где

$$\Omega_1(k; z) = \sum_{n=0}^k \frac{1}{n!(k-n)!} \left(\beta - \frac{1}{2}\right)_{k-n} \left(\frac{1}{2} - \beta\right)_n \Omega(k-n, n; z).$$

Легко видеть, что $\Omega_1(0; z) = \Omega(0, 0; z)$, поэтому функцию $\Omega_1(k; z)$ исследуем при $k \geq 1$.

При каждом k повторив рассуждения, проведенные как в случае $\lambda = 0$, будем иметь $\Omega_1(k; z) = 0$, $k = 1, 2, \dots$. Следовательно,

$$W(x, s; \lambda) \equiv 0, \quad \lambda \neq 0. \quad (8)$$

Объединив результаты (7) и (8), заключаем, что при любых λ справедливо равенство $W(x, s; \lambda) = (1 - z)^\alpha$. Лемма доказана.

Применения операторов (2) и (3). Рассмотрим уравнение (1) в конечной односвязной области D , ограниченной характеристиками

$$AC: \xi \equiv \frac{2}{n+2} x^{(n+2)/2} - \frac{2}{m+2} (-y)^{(m+2)/2} = 0,$$

$$BC: \eta \equiv \frac{2}{n+2} x^{(n+2)/2} - \frac{2}{m+2} (-y)^{(m+2)/2} = 1$$

и $AB: y = 0$ уравнения (1) при $y \leq 0$ и $x \geq 0$, где m , n и μ – действительные числа, причем $-1 < m < 0$, $-1 < n \leq 0$.

В характеристических координатах ξ и η уравнение (1) переходит в уравнение типа обобщенного уравнения Эйлера-Пуассона-Дарбу

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\alpha}{\eta + \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) - \frac{\beta}{\eta - \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) + \lambda u = 0, \quad (9)$$

а область D преобразуется в область Δ , граница которой состоит из отрезков прямых $PM: \xi = 0$, $QM: \eta = 1$ и $PQ: \eta = \xi$, где

$$\alpha = \frac{n}{2(n+2)}, \quad \beta = \frac{m}{2(m+2)}, \quad -1 < 2\alpha \leq 0, \quad -1 < 2\beta < 0, \quad \lambda = \frac{1}{4}\mu.$$

Решение задачи Коши для уравнения (9) в области Δ из класса $R_2^\lambda(\alpha, \beta)$ с начальными данными

$$u(\xi, \xi) = \tau(\xi), \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad (10)$$

$$[2(1 - 2\beta)]^{-2\beta} \lim_{\eta \rightarrow \xi} (\eta - \xi)^{2\beta} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) = \nu(\xi), \quad 0 < \xi < 1 \quad (11)$$

известно [8]:

$$u(\xi, \eta) = \left(\frac{\eta + \xi}{2} \right)^{-\alpha} \int_0^\xi (\eta - t)^{-\beta} (\xi - t)^{-\beta} t^\alpha \Xi_2[\alpha, 1 - \alpha; 1 - \beta; \sigma, \rho] T(t) dt +$$

$$+\left(\frac{\eta+\xi}{2}\right)^{-\alpha} \int_{\xi}^{\eta} (\eta-t)^{-\beta} (t-\xi)^{-\beta} t^{\alpha} \Xi_2[\alpha, 1-\alpha; 1-\beta; \sigma, \rho] N(t) dt, \quad (12)$$

где $T(t)$ – непрерывная и интегрируемая в $(0, 1)$ функция,

$$\begin{aligned} N(t) &= [2 \cos \beta \pi]^{-1} T(t) - \gamma_2 v(x), \\ \gamma_2 &= [2(1-2\beta)]^{2\beta-1} \Gamma(2-2\beta) \Gamma^{-1}(1-\beta), \\ \sigma &= \frac{(\eta-t)(t-\xi)}{2t(\eta+\xi)}, \quad \rho = \lambda(\eta-t)(t-\xi). \end{aligned}$$

Для определения $T(t)$ воспользуемся вышеизложенной теоремой. В самом деле, положив $\eta = \xi = x$, из (12) получим

$$\tau(x) = x^{-\alpha} \int_0^x (x-t)^{-2\beta} t^{\alpha} \Xi_2\left[\alpha, 1-\alpha; 1-\beta; -\frac{(x-t)^2}{4xt}, -\lambda(x-t)^2\right] T(t) dt.$$

Отсюда, в силу формулы (3), найдем

$$\begin{aligned} T(x) &= \frac{\sin 2\beta\pi}{2\beta\pi} x^{-2\alpha} \frac{d}{dx} \left\{ x^{\alpha} \int_0^x t^{\alpha} (x-t)^{2\beta} \times \right. \\ &\times F_{1:0,1}^{0:2,1} \left[\begin{array}{l} - : -\alpha, 1+\alpha; \quad \frac{1}{2} + \beta; \\ 1+\beta : \quad - ; \quad -\frac{1}{2} + \beta; \end{array} \quad \left. -\frac{(x-t)^2}{4xt}, -\lambda(x-t)^2 \right] \tau'(t) dt \right\}. \end{aligned}$$

Приведем другое применение формул обращения (2), (3).

Рассмотрим задачу Коши-Гурса для уравнения (9) с условиями (11) и

$$u(0, \eta) = \varphi(\eta), \quad 0 \leq \eta \leq 1.$$

Решение этой задачи из класса $R_2^{\lambda}(\alpha, \beta)$ имеет явный вид [14]:

$$\begin{aligned} u(\xi, \eta) &= \left(\frac{\eta+\xi}{2}\right)^{-\alpha} \int_0^{\xi} (\eta-t)^{-\beta} (\xi-t)^{-\beta} t^{\alpha} \Xi_2[\alpha, 1-\alpha; 1-\beta; \sigma, \rho] \Psi(t) dt + \\ &+ \left(\frac{\eta+\xi}{2}\right)^{-\alpha} \int_{\xi}^{\eta} (\eta-t)^{-\beta} (t-\xi)^{-\beta} t^{\alpha} \Xi_2[\alpha, 1-\alpha; 1-\beta; \sigma, \rho] \Phi(t) dt, \quad (13) \end{aligned}$$

где $\Psi(x) = 2\gamma_2 \cos \beta\pi \cdot v(x) + \Phi(x)$, $\Phi(x)$ – известная функция.

Формула (13) играет важную роль при изучении задач для уравнений смешанного типа, так как из нее при $\eta = \xi = x$ легко вывести основное функциональное соотношение между $\tau(x)$ и $v(x)$ на линии вырождения, принесенное из гиперболической части смешанной области.

Действительно, предположим в задаче Коши-Гурса $\varphi(x) = 0$ и в (13) положим $\eta = \xi = x$. Тогда получаем интегральное уравнение вида (2). Теперь воспользовавшись теоремой, решение последнего уравнения находим в виде (3).

Выводы. Таким образом, в результате исследований получена формула обращения (3) интегрального уравнения (2) при $-1 < 2\beta < 2\alpha \leq 0$ и произвольных значениях параметра λ . Формула (3) является очень важным инструментом при исследовании локальных и нелокальных краевых задач для уравнений смешанных параболического и эллиптико-гиперболического типов второго рода со спектральным параметром.

Список литературы: 1. *Colton D.* Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory (Series: Applied Mathematical Sciences. Book 82) / *D. Colton, R. Kress* // Springer, 3rd ed., 2014. – 412 p. 2. *Li M.* Solving Abel's type integral equations with Mikusinski's operator of fractional order / *M. Li, W. Zhao* // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mathematical Physics. – 2014. – Vol. 19. – № 5. – P. 49-59. 3. *Самко С.Г.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения / *С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И. Маричев*. – Минск, "Наука и техника", 1987. – 688 с. 4. *Polyanin A.D.* Handbook of integral equations / *A.D. Polyanin, A.V. Manzhirov* // CRS Press. – 2008. – 1444 p. 5. *Смирнов М.М.* Уравнения смешанного типа / *М.М. Смирнов*. – М.: "Высшая школа", 1985. – 304 с. 6. *Saigo M.A.* Remark on Integral Operators Involving the Gauss Hypergeometric Functions / *M.A. Saigo* // Mathematical Reports of College of General Education, Kyushu University. – 1978. – Vol. 11. – № 2. – P. 135-143. 7. *Салахитдинов М.С.* Задача Трикоми для уравнения смешанного типа с негладкой линией вырождения / *М.С. Салахитдинов, А. Хасанов* // Дифференциальные уравнения. – Минск, 1983. – Т. 19. – № 1. – С. 110-119. 8. *Салахитдинов М.С.* К спектральной теории уравнений смешанного типа / *М.С. Салахитдинов, А.К. Уринов*. – Ташкент: "Mumtoz so'z", 2010. – 356 с. 9. *Смирнов М.М.* Решение в замкнутой форме уравнения Вольтерра с гипергеометрической функцией в ядре / *М.М. Смирнов* // Дифференциальные уравнения, 1982. – Т. 13. – № 1. – С. 171-173. 10. *Эргашев Т.Г.* Интегральное представление обобщенного решения задачи Коши для одного вырождающегося гиперболического уравнения второго рода / *Т.Г. Эргашев*. // Материалы VI Ферганской конференции "Предельные теоремы теории вероятностей и их приложения". – Ташкент, 2011. – С. 269-271. 11. *Кароль И.Л.* Об одной краевой задаче для уравнения смешанного эллиптико-гиперболического типа / *И.Л. Кароль* // ДАН, 1953. – Т. 88. – № 2. – С. 197-200. 12. *Эргашев Т.Г.* Задача Коши для вырождающегося гиперболического уравнения второго рода / *Т.Г. Эргашев* // Узбекский математический журнал. – 2009. – № 4. – С. 180-190. 13. *Эргашев Т.Г.* Обобщенные решения одного вырождающегося гиперболического уравнения второго

рода со спектральним параметром / Т.Г. Эргашев // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 46. – С. 41-49.

14. Эргашев Т.Г. Обобщенное решение задачи Коши-Гурса для одного вырождающегося гиперболического уравнения второго рода со спектральным параметром / Т.Г. Эргашев // Тезисы докладов Республиканской научной конференции с участием ученых из стран СНГ "Современные проблемы дифференциальных уравнений и их приложения". – Ташкент, 2013. – С. 115-117.

15. Srivastava H.M. *Multipl. Gaussian Hypergeometric Series* / H.M. Srivastava, P.W. Karlsson. – Halsted Press (Ellis Horwood Limited, Chichester), John Wiley and Sons. – New York, Chichester, Brisbane and Toronto, 1985. – 386 p.

16. Erdelyi A. *Higher transcendental functions* / A. Erdelyi. – 1953. – Vol. 1. – New York: McGraw Hill Book. Co. – 302 p.

References:

1. Colton, D. and Kress, R. (2014), *Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory (Series: Applied Mathematical Sciences. Book 82)*, 3rd ed., Springer, 412 p.
2. Li, M. and Zhao, W. (2014), "Solving Abel's type integral equations with Mikusinski's operator of fractional order", *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mathematical Physics*, Vol. 19, No 5, pp. 49-59.
3. Samko, S.G., Kilbas, A.A. and Marichev, O.I. (1987), *Integrals and derivatives of fractional order and some of their applications*, "Nauka i tehnika", Minsk, 688 p.
4. Polyanin, A.D. and Manzhirov, A.V. (2008), *Handbook of integral equations*, CRS Press, 1444 p.
5. Smirnov, M.M. (1985), *Equations of mixed type*, "Vysshaja shkola", Moscow, 304 p.
6. Saigo, M.A. (1978), "Remark on Integral Operators Involving the Gauss Hypergeometric Functions", *Mathematical Reports of College of General Education*, Kyushu University, Vol. 11, No 2, pp. 135-143.
7. Salakhitdinov, M.S. and Hasanov, A. (1983), "The Tricomi problem for a mixed-type equation with a nonsmooth degeneration line", *Differential equations*. Minsk, Vol.19, No 1, pp. 110-119.
8. Salakhitdinov, M.S. and Urinov, A.K. (2010), *The spectral theory of equations of mixed type*, "Mumtozso'z", Tashkent, 356 p.
9. Smirnov, M.M. (1982), "Solution in the closed form of the Volterra equation with hypergeometric function in the kernel", *Differential equations*. Minsk, Vol. 13, No. 1, pp. 171-173.
10. Ehrgashev, T.G. (2011), "Integral representation of the generalized solution of the Cauchy problem for a degenerate hyperbolic equation of the second kind", *Proceedings of the VI Fergana Conference "Limit theorems of probability theory and their applications"*, Fehrgana, 10-12 may 2011, Tashkent, pp. 269-271.
11. Karol', I.L. (1953), "On a boundary-value problem for an equation of mixed elliptic-hyperbolic type", *Reports of the Academy of Sciences of USSR*, Vol. 88, No. 2, pp. 197-200.
12. Ehrgashev, T.G. (2009), "The Cauchy problem for a degenerate hyperbolic equation of the second kind", *Uzbek Mathematical Journal*, No. 4, pp. 180-190.
13. Ehrgashev, T.G. (2017), "Generalized solutions of the degenerate hyperbolic equation of the second kind with a spectral parameter", *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, Vol. 46, pp. 41-49.
14. Ehrgashev, T.G. (2013), "Generalized solution of the Cauchy-Goursat problem for a degenerate hyperbolic equation of the second kind with a spectral parameter", *Theses of reports of the Republican scientific conference with the participation of scientists from the CIS countries "Modern problems of differential equations and their applications"*, November 21-23, 2013, Tashkent, pp. 115-117.

15. Srivastava, H.M. and Karlsson, P.W. (1985), *Multipl. Gaussian Hypergeometric Series*, Halsted Press (Ellis Horwood Limited, Chichester), John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane and Toronto, 386 p.

16. Bateman, H. and Erdelyi, A. (1953), *Higher transcendental functions*, Vol. 1, Mc Graw-Hill Book Company, New York, Toronto, London, 302 p.

Статью представил ведущий сотрудник Института математики им. В.И. Романовского АН Узбекистана д-р физ.-мат. наук Анвар Хасанов.

Поступила 17.08.2017.

Ehrgashev Tuhtasin, Cand. Phy.-Math. Sci., Associate professor
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Uzbekistan, Tashkent, 100000, Kari-Niyazi st., 39
Tel.: +99894 673 1869, +99871 2230524, E-mail: ertuhtasin@mail.ru

УДК 517.956.6;517.44

Формула звернення інтегрального рівняння Вольєрра з функцією Гумберта в ядрі і її додатки до рішення крайових задач / Ергашев Т.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 75 – 87.

Багато задач прикладної математики зводяться до вирішення інтегральних рівнянь зі спеціальними функціями в ядрах, тому формули звернення таких рівнянь відіграють важливу роль при вирішенні різних завдань. В роботі введена і розглянута одна вироджена гіпергеометрична функція від двох змінних, через яку виражається рішення досліджуваного інтегрального рівняння Вольєрра першого роду. Знайдена формула звернення застосована до знаходження деяких співвідношень між шуканим рішенням і його похідної крайової задачі для гіперболічного рівняння з двома лініями виродження і з спектральним параметром. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: інтегральне рівняння Вольєрра першого роду, формула звернення, вироджена гіпергеометрична функція від двох змінних, спектральний параметр.

УДК 517.956.6;517.44

Формула обращения интегрального уравнения Вольерра с функцией Гумберта в ядре и её приложения к решению краевых задач / Эргашев Т.Г. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 75 – 87.

Многие задачи прикладной математики сводятся к решению интегральных уравнений со специальными функциями в ядрах, поэтому формулы обращения таких уравнений играют важную роль при решении различных задач. В работе введена и рассмотрена одна вырожденная гипергеометрическая функция от двух переменных, через которую выражается решение исследуемого интегрального уравнения Вольерра первого рода. Найденная формула обращения применена к нахождению некоторых соотношений между искомым решением и его производной краевой задачи для гиперболического уравнения с двумя линиями вырождения и со спектральным параметром. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: интегральное уравнение Вольерра первого рода, формула обращения, вырожденная гипергеометрическая функция от двух переменных, спектральный параметр.

УДК 517.956.6;517.44

The inversion formula for the Volterra integral equation with the Humbert function in the nuclear and its applications to the boundary value problems / Erganashev T.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 75 – 87.

Many problems of applied mathematics are reduced to the solution of integral equations with special functions in kernels, therefore the inversion formulas for such equations play an important role in solving various problems. The paper introduces and considers one degenerate hypergeometric function of two variables, through which the solution of the Volterra integral equation of the first kind is analyzed. The inversion formula found is applied to finding some relations between the desired solution and its derivative of the boundary value problem for a hyperbolic equation with two degeneration lines of the second kind and with a spectral parameter. Refs.: 16 titles.

Keywords: Volterra integral equation of the first kind, the inversion formula, the degenerate hypergeometric function of two variables, the spectral parameter.

G.A. SAMIGULINA, Doctor of Technical Sciences, Head of the lab. "Intelligent Systems of Control and Forecasting", Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan,
Zh.A. MASSIMKANOVA, Master, Junior researcher of the lab "Intelligent Systems of Control and Forecasting", Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan

COMPUTER MODELING OF NEW DRUGS BASED ON THE METHODS OF SWARM INTELLIGENCE AND IMMUNE NETWORK MODELING

The article is devoted to the development of an intellectual information system for conducting scientific research and for predicting the dependence "structure-property/activity" of new drugs based on algorithms of swarm intelligence and immune-network modeling. Selection of informative descriptors is carried out on the basis of a multi-algorithmic approach, which allows selecting the algorithm in which the generalization error will be minimal after immune network modeling. Algorithms are distinguished by the presence of customizable parameters that affect the productivity of an intelligent information system. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: medications, swarm intelligence, information system, immunosetting modeling, information descriptors.

The statement of the problem. Designing of new medicinal compounds is a complex process consisting of several stages, which takes a lot of time and requires significant labor and financial costs. The study of chemical compounds involves the processing of multidimensional data sets. The development of computer technology made it possible to apply the methods and algorithms of bioinformatics for the processing and analysis of accumulated chemical data. The application of these methods is relevant for the construction of databases of medicinal compounds, for predicting the physical, chemical and biological properties of substances.

Nowadays the development of modern non-traditional information technologies for the processing of large amounts of data is urgently needed in order to improve the efficiency of the process of drugs creation. Analysis of the structure of compounds with given properties allows to predict the structure of a new compound. Prediction of the structure-property/activity relationship of drug substances and the identification of relationships between the structure of compounds and their activity [1] is an actual

problem in pharmacology.

In prediction tasks the description of the system's behavior based on the optimal set of descriptors has a great importance. Unnecessary and redundant data reduces system productivity. One of the main stages of the process of information extracting from a large volume of accumulated data is the stage of preliminary processing of the initial data, which includes the allocation of informative features. Creation of an adequate model based on the optimal set of descriptors increases the probability of making the right decisions.

The statement of the problem is formulated as follows: it is necessary to solve the problem of informative descriptors selection on the basis of algorithms of the swarm intelligence (algorithm of the ant colony and the particle swarm method) for further immune network modeling of the sulfanilamide group medicines with the given properties. The purpose of an optimal set of descriptors selection is to reduce the dimension of the descriptor space. Actual is the use of modern QSAR (Quantitative structure-activity relationship) methods of drug design based on intellectual approaches that can significantly simplify the process of selecting new chemical compounds with prescribed properties for drug candidates.

Literature review. Today artificial intelligence methods are successfully used to detect new patterns in chemical data. These include neural networks, evolutionary algorithms, artificial immune systems, algorithms of swarm intelligence, etc. At present methods of swarm intelligence are promising directions and are widely used in many fields of medicine and pharmacology. The methods of swarm intelligence, based on the behavior modeling of living beings, include: the methods of ants and bee colony, the algorithm of a particle swarm, cuckoo, gray wolves, bats, gravitational search, etc. The most common of them are the ant colony algorithm and the particle swarm method. The proposed algorithms more effectively explore the search space, spending less time than the methods of full search.

In article [2] there is considered a model based on the ant algorithm for predicting the tertiary structure of a protein. The algorithm is investigated and is focused on proving its convergence to a global solution. This allows for further research to construct procedures for adaptive selection of parameters at each iteration of the algorithm, depending on the nature of its convergence. This method makes it possible to reduce the number of parameters arriving at the input of the algorithm. In work [3] there is proposed a new computer molecular design for the development of solvents based on the algorithm of efficient ant colony optimization (EACO). The article [4] is devoted to ACO-MLR (Ant Colony Optimization-Multiple linear regression) for the development of QSPR (Quantitative structure-property relationship)

algorithm, in which the main problem is the multidimensional descriptor space.

In work [5] there are considered algorithms of swarm intelligence for solving certain problems of bioinformatics, such as data clustering, prediction of the protein structure and molecular docking. In article [6] there are studied a chaotic optimization algorithm and a particle swarm optimization algorithm to improve the classification accuracy, which are used in the selection of data sets with certain pharmacodynamic properties of the drug. The experimental results show that the proposed method has good learning ability, the ability to generalize and the accuracy of classification.

In work [7] there are considered and discussed particle swarm algorithms in problems of secondary prediction of structure, gene association into clusters, energy minimization and protein modeling. The article [8] presents a comparative analysis of the particle swarm method and the bee algorithm as the solution of the protein structure prediction problem. A new method of PSOVina (Particle Swarm Optimization Vina), which combines PSO with the effective local search method of Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shannon (BFGS) is proposed in the article [9].

A new algorithm is considered in work [10], which defines associative rules for classification based on swarm intelligence. The main idea is to develop an algorithm that can demonstrate good productivity at the selection of data sets with uneven distribution of classes. The results show that the proposed method works best for weakly and strongly unstructured data sets.

Immune network technology of predicting QSAR of chemical compounds. In work [11] there was developed an immune-network technology for predicting the structure-property/activity dependency of chemical compounds, which consists of preliminary data processing stage, the immune network training stage, image recognition stage, the stage of energy errors evaluation and the prediction of the pharmacological properties of chemical compounds. Intellectual technology based on immune network modeling allows analyzing hidden interactions between descriptors. At the stage of preliminary data processing there is carried out the normalization, completeness check and reliability of the descriptors. The selection of informative descriptors is performed on the basis of algorithms of swarm intelligence in accordance with the concept of multi-algorithm approach, at which several algorithms are used. After the immune network modeling based on the comparison of the prediction results, an algorithm with the least generalization error is selected. The application of algorithms of swarm intelligence allows to reduce the time for immune network training by creating an optimal immune network model and to exclude low-information descriptors.

There was developed an integrated structural scheme of an intelligent information system (Fig. 1), which consists of modules of preliminary processing, image recognition and energy error evaluation. The preprocessing module includes the selection of informative descriptors based on the algorithm of the ant colony and the method of the particle swarm.

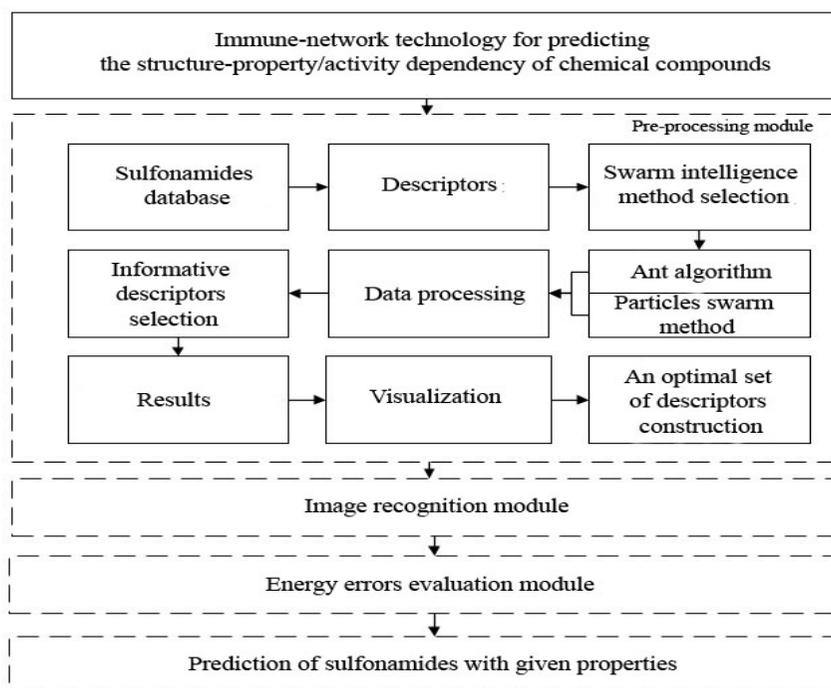


Fig. 1. Structural diagram of intellectual immune network technology

Processing module for chemical compounds "SIIM" (Swarm Intelligence for Immune network Modeling). Developing the primary data processing module "SIIM" there was used the programming language Python 3.6 using PyQt. The following algorithm for the functioning of the "SIIM" system has been developed.

Algorithm:

Step 1. Connecting the database.

Step 2. Choosing a method of swarm intelligence (an ant algorithm or a particle swarm method).

Step 3. Entering the coefficients (number of populations, number of iterations, weight, speed).

Step 4. Data processing and selection of informative descriptors.

Step 5. Construction of an optimal set of descriptors.

Step 6. Output of the result of the algorithm.

Description of the sulfonamides database. Intellectual technology of immune network modeling includes work with chemical compounds descriptors databases. As an example there were used 15 chemical compounds of sulfonamides and 1500 descriptors of different levels. Chemical compounds were classified into short-acting, medium-acting and long-acting sulfanilamides. There were considered such descriptors as: number of atoms, relative number of carbon atoms, relative number of hydrogen atoms, molecular weight, number of single bonds, gravitation index and others.

Experimental results. In the developed intellectual information system "SIIM" (Fig. 2) with the help of "Data connection" button, the database is selected and is displayed in the first window. Then, there is carried out an algorithm selection (an algorithm of an ant colony or a particle swarm method) and coefficients input. In the algorithm of the ant colony the following coefficients are used: the number of population, the number of iterations, the amount of pheromone, the pheromone vaporization, report frequency. After starting, modeling results are displayed in the second window. The system has the ability to visualize in the form of a graph.

The screenshot shows the SIIM software interface with two main optimization panels: Ant Colony Optimization and Particle Swarm Optimization. The Ant Colony Optimization panel has parameters: Population size 100, Number of generations 50, c1 1, and c2 2. The Particle Swarm Optimization panel has Report frequency 50. Below these is a 'Database connection' table with 15 rows of chemical classes and their descriptors. To the right is a 'Run' table with 15 rows of optimization results.

Database connection						Run									
Class	Number of atoms	relative number of C atoms	relative number of H atoms	relative number of O atoms	relative number of N atoms	relative number of S atoms	relative number of Cl atoms	relative number of F atoms	relative number of Br atoms	relative number of I atoms	relative number of other atoms				
1 short_acting	27.00	0.37	0.37	0.07	0.15	0.04	1.24	-0.38	-0.19	522.00	0.00	0.35	-0.07		
2 short_acting	33.00	0.36	0.42	0.06	0.12	0.03	0.22	-0.06	-0.23	839.00	-0.14	0.77	-0.02		
3 short_acting	31.00	0.35	0.42	0.10	0.10	0.03	1.51	0.37	-0.06	720.00	-0.25	-0.20	-0.03		
4 short_acting	27.00	0.33	0.37	0.07	0.15	0.07	2.59	-0.36	0.03	502.00	-0.29	-0.29	0.15		
5 short_acting	46.00	0.33	0.54	0.04	0.07	0.02	0.09	-0.30	0.08	1040.00	0.08	0.57	-0.07		
6 short_acting	33.00	0.36	0.42	0.06	0.12	0.03	0.22	-0.06	-0.23	839.00	-0.14	0.77	-0.02		
7 short_acting	46.00	0.33	0.54	0.04	0.07	0.02	0.09	-0.30	0.08	1040.00	0.08	0.57	-0.07		
8 medium_acting	24.00	0.33	0.42	0.13	0.08	0.04	2.47	0.48	0.06	321.00	-0.16	-0.53	-0.14		
9 medium_acting	35.00	0.34	0.40	0.11	0.11	0.03	0.45	-0.23	0.02	1050.00	-0.03	0.54	0.00		
10 medium_acting	28.00	0.36	0.39	0.11	0.11	0.04	0.90	-0.57	-0.05	584.00	0.05	0.52	-0.17		
11 medium_acting	31.00	0.35	0.42	0.10	0.10	0.03	0.05	0.00	0.14	625.00	-0.02	0.39	-0.14		
12 long_acting	35.00	0.34	0.40	0.11	0.11	0.03	0.45	-0.23	0.02	1050.00	-0.03	0.54	0.00		
13 long_acting	36.00	0.42	0.39	0.06	0.11	0.03	1.11	0.28	-0.25	1289.00	-0.04	-0.04	0.09		
14 long_acting	31.00	0.35	0.39	0.10	0.13	0.03	0.69	0.21	-0.11	817.00	-0.11	0.11	-0.05		
15 long_acting	30.00	0.37	0.40	0.07	0.13	0.03	1.47	0.04	-0.27	666.00	-0.23	-0.21	0.05		

Fig. 2. Sulfanilamides modeling results based on the ant algorithm

Fig. 2 shows the results of sulfanilamides modeling based on the ant algorithm. During the modeling the size of the population is 100, the number of iterations is 50, c_1 (the amount of pheromone) = 1, c_2 (pheromone evaporation) = 2, report frequency = 50. As a result, from 1500 descriptors there were selected 25 informative ones.

Similarly to this the intelligent system works with the particle swarm method [12]. There is selected that algorithm which after the immune network modeling shows the best prognostic results.

Conclusion. In this article there was solved the task of informative sulfanilamides descriptors selection for constructing an optimal immune network model and further immune network modeling of new drugs in accordance with the concept of multi-algorithm approach. During the developing of intelligent system for predicting the pharmacological activity of drug compounds based on immune network modeling, the main task is to reduce the generalization error and to improve the quality of the prognosis. Nowadays, there are no universal methods for constructing an optimal set of descriptors.

The advantage of multi-algorithm approach usage is the possibility of choosing an algorithm with the best prognostic properties after immune network modeling. The results of modeling differ from each other depending on the size and type of data, the availability of independent descriptors, the optimality criteria and stopped criteria. The presented intellectual immune network technology of scientific research allows to analyze hidden interactions between descriptors, to reduce financial and computing resources.

The research is conducted on the grant of the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (No. GR 0115PK00549) on the theme: Computer molecular design of medicines based on immune network modeling (2015-2017).

References:

1. Golla, S., Neely, B., Whitebay, E., Madihally, S., Robinson, R., and Gasem, K. (2002). "Virtual design of chemical penetration enhancers for transdermal drug delivery", *Chem. Biol. Drug Design*, pp. 478-487.
2. Niu, D., Wang, Y., and Wu, D.D. (2010). "Power load forecasting using support vector machine and ant colony optimization", *Expert Systems with applications*, Vol. 37, pp. 2531-2539.
3. Liu, Y., Wang, G., Chen, H., Zhao, Z., Zhu, X., and Liu, Z. (2011). "An adaptive fuzzy ant colony optimization for feature selection", *Journal of Computational Information Systems*. Vol. 7, pp. 1206-1213.
4. Morteza, A., Kobra, Z., and Azam, B. (2013). "Ant colony optimization as a descriptor selection in QSPR modeling: Estimation of the k-max of anthraquinones-based dyes". *Journal of Saudi Chemical Society*, Vol. 20, Supplement 1, pp. 2-5.
5. Agrawal, S., and Silakari, S. (2015). "A review on application of Particle Swarm Optimization in Bioinformatics", *Current bioinformatics*, Vol. 10, pp. 401-413.

6. Liu, F., and Zhou, Z. (2015). "A new data classification method based on chaotic particle swarm optimization and least square-support vector machine", *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, Vol. 147, pp. 147-156.
7. Zakaria, N., and Abdullah, R.A. (2013). "Comparison between Artificial Bee Colony and Particle Swarm Optimization Algorithms for Protein Structure Prediction Problem", *Neural Information Processing*, Vol. 8227, pp. 331-340.
8. Marcus, C., Fong, S., and Siu, W.I. (2015). "PSOVina: The hybrid particle swarm optimization algorithm for protein-ligand docking", *Journal of bioinformatics and computational biology*, Vol. 13, Issue 3, pp. 154-157.
9. Allias, N., Mohamed-Noor, M., Ismail, N., and de Silva, K. (2013). "A Hybrid Gini PSO-SVM Feature Selection: An Empirical Study of Population Sizes on Different Classifier", *Proceedings of First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation*, IEEE, pp. 94-97.
10. Das, S., Abraham, A., and Konar, A. (2015). "Swarm Intelligence Algorithms in Bioinformatics". www.softcomputing.net/cib-web.pdf.
11. Samigulina, G.A., and Samigulina, Z.I. (2017). "Immune Network Technology on the basis of random forest algorithm for computer-aided drug design". *Bionformatics and biomedical engineering*, pp. 50-61.

Статтю представив д-р техн. наук., проф. НТУ "ХПІ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 21.11.2017

Samigulina Galina, Dr. Sci. Tech,
Institute of Information and Computational Technologies,
Str. Pushkin, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010,
Tel:+7(777)244-43-67, e-mail: galinasamigulina@mail.ru

Massimkanova Zhazira, master,
Institute of Information and Computational Technologies
Str. Pushkin, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010,
Tel:+7(707) 834-61-77, e-mail: masimkanovazh@gmail.com

УДК 004.89:004.4

Комп'ютерне моделювання нових лікарських препаратів на основі алгоритмів ройового інтелекту і імунносетевого моделювання / Самігуліна Г.А., Масімканова Ж.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 88 – 95.

Стаття присвячена розробці інтелектуальної інформаційної системи ведення наукових досліджень і прогнозуванню залежності структура-властивість / активність нових лікарських препаратів на основі алгоритмів ройового інтелекту і імунносетевого моделювання. Відбір інформативних дескрипторів здійснюється на основі мультіалгоритмічного підходу, який дозволяє вибрати той алгоритм, при якому після імунносетевого моделювання помилка узагальнення буде мінімальною. Алгоритми відрізняються наявністю настроюються параметри, які впливають на продуктивність інтелектуальної інформаційної системи. Іл.: 2. Бібліорг.: 11 назв.

Ключові слова: лікарські препарати; ройовий інтелект; інформаційна система; імунносетевое моделювання; інформаційні дескриптори.

УДК 004.89:004.4

Компьютерное моделирование новых лекарственных препаратов на основе алгоритмов роевого интеллекта и иммунносетевого моделирования / Самигулина Г.А., Масимканова Ж.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 88 – 95.

Статья посвящена разработке интеллектуальной информационной системы ведения научных исследований и прогнозирования зависимости структура-свойство / активность новых лекарственных препаратов на основе алгоритмов роевого интеллекта и иммунносетевого моделирования. Отбор информативных дескрипторов осуществляется на основе мультиалгоритмического подхода, который позволяет выбрать тот алгоритм, при котором после иммунносетевого моделирования ошибка обобщения будет минимальной. Алгоритмы отличаются наличием настраиваемых параметры, которые влияют на производительность интеллектуальной информационной системы. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: лекарственные препараты; роевой интеллект; информационная система; иммунносетевое моделирование; информационные дескрипторы.

УДК 004.89:004.4

Computer modeling of new drugs based on the methods of swarm intelligence and immune network modeling / Samigulina G.A., Massimkanova Zh.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 88 – 95.

The article is devoted to the development of an intellectual information system for conducting scientific research and for predicting the dependence "structure-property/activity" of new drugs based on algorithms of swarm intelligence and immune-network modeling. Selection of informative descriptors is carried out on the basis of a multi-algorithmic approach, which allows selecting the algorithm in which the generalization error will be minimal after immune network modeling. Algorithms are distinguished by the presence of customizable parameters that affect the productivity of an intelligent information system. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: medications, swarm intelligence; information system; immunosetting modeling; information descriptors.

***Проблемы защиты информации в
современных системах***

О.Г. ГРИБ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
С.В. ШВЕЦ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
А.В. БОРТНИКОВ, асп., НТУ "ХПИ"

СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ В УСЛОВИЯХ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Среди аппаратных решений киберзащиты современных энергосистем предложено в их инфраструктуре управления вводить резервирование ключевых элементов для повышения надежности и, тем самым, обеспечения необходимого уровня кибербезопасности. Получены соотношения кратности резервирования элементов для случаев наличия и отсутствия ограничений на минимально допустимые значения вероятностей их безотказной работы. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: энергосистема; резервирование; надежность; кибербезопасность; инфраструктура управления.

Постановка проблемы. Энергетика, по сути, является инфраструктурной отраслью, ее задача – обеспечение энергоснабжения потребителей с требуемой надежностью и приемлемым качеством энергоносителя.

На протяжении последнего десятилетия обсуждается проблема создания интеллектуальных электроэнергетических систем (ЭЭС) – Smart Grid [1]. Во многих странах это обусловлено несколькими основными факторами: ожидаемым широким распространением сильно флуктуирующих возобновляемых источников энергии, дополнительным спросом на электроэнергию, связанным с постепенным переходом на электромобили, развитием информационных технологий, позволяющих создать качественно новые высокоэффективные системы мониторинга и управления ЭЭС.

Основными достигнутыми результатами должны стать наблюдаемость, контролируемость, автоматизация управления электроэнергетической системой (ЭЭС), обеспечивающие её высокую надёжность и высокие экономические показатели работы [2].

Очевидно, что успешная реализация этой концепции требует повышенного внимания к проблемам кибербезопасности, поскольку усложнение современных информационных технологий увеличивает уязвимость создаваемых систем [3].

С одной стороны, популярность тематики кибербезопасности АСУ ТП и атак на промышленные системы растет, и будет расти с каждым годом. С другой стороны – автоматизация объектов ЭЭС и открываемые

ею новые горизонты для кибервойны являются чересчур лакомым кусочком для террористических организаций и спецслужб недружественных стран, чтобы их игнорировать [4]. И так как степень автоматизации объектов ЭЭС в дальнейшем будет только расти, риски, связанные с кибератаками на эти объекты, также будут расти.

В современных условиях функционирования энергетической отрасли появилась проблема кибератак на критически важные элементы энергосистемы. Из-за их наличия происходят отключения энергоснабжения потребителей разных категорий, которые проявляются в виде недоотпуска электроэнергии. Эти нарушения сопровождаются потерями данных о режимах работы энергосистемы, что, в свою очередь, ведет к усложнению регулирования перетоками мощностей между частями энергосистемы и может вызвать глобальные системные аварии с тяжкими последствиями для единой энергосистемы страны. В связи с этим становятся актуальными исследования, связанные с повышением надежности функционирования самой системы управления режимами энергосистемы.

Анализ литературы. Современные кибератаки отличаются от тех угроз, с которыми мы привыкли иметь дело и против которых у нас есть средства защиты. Стремительное распространение компьютерной среды, развитие информационных технологий и тенденция перехода к интеллектуальной энергетике делают киберугрозы одной из важнейших тактических угроз энергетической безопасности [5].

В современных условиях, кибербезопасность в электроэнергетике являет собой набор средств, стратегий, принципов обеспечения и гарантий безопасности, подходов к управлению рисками, действий, профессиональной подготовки, страхования и технологий, которые используются для защиты киберсреды, ресурсов энергосистем и потребителей [6].

Проблема кибербезопасности для Украины сегодня уже не нова. Стоит вспомнить недавнюю атаку вируса Petya.A, которая произошла 27 июня 2017 года. Наибольший ущерб понесла именно Украина. В результате кибератаки были заблокированы более 12 тысяч компьютеров в различных государственных и частных учреждениях, среди которых "Киевэнерго", Укрэнерго и корпорация ДТЭК.

Дальнейшее развитие концепций Smart Grid и сетецентрического управления [7, 8] существенно обостряет значение обозначенных проблем. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга элементов энергосистем [9] создает дополнительные трудности в реализации защитных функций на аппаратном и программном уровнях.

Среди аппаратных методов, обеспечивающих киберзащиту

современных энергосистем, выделяются методы, суть которых заключается в выделении критических функций управления режимами работы защит от повреждения оборудования [10]. Предлагается, с одной стороны, исключить саму возможность кибератаки на эти элементы защиты путем реализации их не на цифровой базе. Второе направление – введение резервирования важнейших элементов системы управления энергосистемы. Данный подход обеспечит требуемый уровень кибербезопасности энергосистемы при заданных значениях надежности ключевых элементов.

Цель статьи. Развитие алгоритмов синтеза системы управления режимами энергосистемы за счет резервирования ключевых элементов при требуемом уровне кибербезопасности.

Основной раздел. Будем рассматривать сложную систему управления режимами энергосистемы, которая состоит из отдельных подсистем. Отказ любой из них приводит к отказу всей системы управления в целом. Каждая из подсистем может быть реализована $u_i(l_i)$ способами, характеризующимися различными значениями технико-экономических параметров (надежность, вес, стоимость, габариты, энергопотребление и т.п.). Требуется определить вариант системы (выбрать вариант реализации каждой подсистемы), который доставляет экстремум целевой функции надежности P и обеспечивает успешное решение всех задач управления режимами энергосистемы с вероятностями не ниже заданных, при этом затраты не должны превосходить заданной границы.

Математическая модель этой задачи имеет следующий вид: определить вариант системы управления энергосистемы v_0 , доставляющий максимум функции

$$P(v) = \prod_{j=1}^n P_j(u_{j(l_j)}), \quad (1)$$

при наличии ограничений

$$\begin{aligned} g_p(v) &= \sum_{j=1}^n g_p(u_{j(l_j)}) \leq g_p^* \quad (p = 1, \dots, q), \\ g_p(v) &= \sum_{j=1}^n g_p(u_{j(l_j)}) \geq g_p^* \quad (p = q+1, \dots, Q), \\ v \in V, \quad u_{j(l_j)} &\in U_j \quad (j = 1, \dots, n), \end{aligned} \quad (2)$$

где $P_j(u_{j(l_j)})$ – надежность (вероятность безотказной работы на заданном интервале времени) элемента j -й подсистемы l_j -го типа; $U_j = \{u_{j(1)}, \dots, u_{j(l_j)}, \dots, u_{j(\xi_j)}\}$, ($j = 1, \dots, n$) – совокупность элементов различных типов, которые могут быть использованы в j -й подсистеме, количество элементов во множестве U_j равно ξ_j ;

$$V = \prod_{j=1}^n U_j; \quad (3)$$

$g_p(u_{j(l_j)})$ – значение p -го ограничивающего фактора для элемента l -го типа j -й подсистемы; g_p^* – максимально возможное количество p -го ограничивающего фактора для всей системы в целом; $g_p(v)$ – количество p -го ограничивающего фактора, израсходованного на всю систему; V – множество принципиально возможных вариантов системы управления режимами энергосистемы.

Задачи типа (1), (2) эквивалентны следующей задаче: найти максимум

$$f(v) = \sum_{j=1}^n f_j(u_{j(l_j)}) \quad (4)$$

при наличии (2), где $f_j(u_{j(l_j)}) = \lg P_j(u_{j(l_j)})$. Таким образом, задача оптимального проектирования системы управления режимами энергосистемы по критерию надежности с учетом требуемого уровня кибербезопасности свелась к задаче вида (1), (2), (4).

В нашем случае под резервированием элементов подсистемы (при условии, что используемые ресурсы исчерпаны не полностью) понимается следующее. Если произведено резервирование в j -й подсистеме, и она содержит $\lambda_j + 1$ элементов (λ_j резервных и один основной), то выход ее из строя происходит при выходе из строя всех $\lambda_j + 1$ элементов – так называемое "параллельное резервирование".

На первом этапе решения поставленной задачи резервирования отсеиваются все типы элементов, которые учитывать в дальнейшем нет необходимости.

Основой предлагаемого подхода является процедура Z последовательного отсева значений $u_{j(l_j)} \in U_j$ ($j = 1, \dots, n$), т.е.

элементов решения задачи $v = (u_{1(l_1)}, \dots, u_{j(l_j)}, \dots, u_{n(l_n)}) \in V$. Основная процедура состоит из Q "элементарных" процедур W_1^p ($p=1, \dots, Q$), каждая из которых заключается в отсеке по p -му ограничению элементов $u_j = u_{j(l_j)}$, $l_j \in J_j = \{1, \dots, \xi_j\}$, $j=1, \dots, n$, удовлетворяющих неравенству

$$g_p(u_{1(l_1)}^{p(l_j)}, u_{2(l_2)}^{p(l_j)}, \dots, u_{j-1(l_{j-1})}^{p(l_j)}, u_{j(l_j)}^{p(l_j)}, u_{j+1(l_{j+1})}^{p(l_j)}, \dots, u_{n(l_n)}^{p(l_j)}) \geq g_p^*, \quad (5)$$

где при $p=1, \dots, q$

$$\begin{aligned} v^{p(l_j)} &= (u_{1(l_1)}^{p(l_j)}, u_{2(l_2)}^{p(l_j)}, \dots, u_{j-1(l_{j-1})}^{p(l_j)}, u_{j(l_j)}^{p(l_j)}, \\ u_{j+1(l_{j+1})}^{p(l_j)}, \dots, u_{n(l_n)}^{p(l_j)}) &\equiv (v^{p(l_j)} \setminus U_j, u_{j(l_j)} = \\ &= \arg \min_{v \in (V \setminus U_j) \cup (u_{j(l_j)})} g_p(v). \end{aligned} \quad (6)$$

При $p=q+1, \dots, Q$ справедливо неравенство

$$g_p(u_{1(l_1)}^{p(l_j)}, u_{2(l_2)}^{p(l_j)}, \dots, u_{j-1(l_{j-1})}^{p(l_j)}, u_{j(l_j)}^{p(l_j)}, u_{j+1(l_{j+1})}^{p(l_j)}, \dots, u_{n(l_n)}^{p(l_j)}) < g_p^*, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} v^{p(l_j)} &= (u_{1(l_1)}^{p(l_j)}, u_{2(l_2)}^{p(l_j)}, \dots, u_{j-1(l_{j-1})}^{p(l_j)}, u_{j(l_j)}^{p(l_j)}, \\ u_{j+1(l_{j+1})}^{p(l_j)}, \dots, u_{n(l_n)}^{p(l_j)}) &\equiv (v^{p(l_j)} \setminus U_j, u_{j(l_j)} = \\ &= \arg \max_{v \in (V \setminus U_j) \cup (u_{j(l_j)})} g_p(v). \end{aligned} \quad (8)$$

Перепишем условия (5) с учетом (6) и (7) и с учетом (8) в виде:

$$\begin{aligned} g_p(v^{p(l_j)} \setminus U_j, u_{j(l_j)}) &> g_p^*, \quad p=1, \dots, q; \\ g_p(v^{p(l_j)} \setminus U_j, u_{j(l_j)}) &< g_p^*, \quad p=q+1, \dots, Q. \end{aligned} \quad (9)$$

Перенумеруем оставшиеся элементы во множествах

U_j ($j=1, \dots, n$) и после следующего отсева по ограничениям (2) и (4) получим

$$U'_j = \{u_{j(1)}, \dots, u_{j(l_j)}, \dots, u_{j(\xi'_j)}\}, \quad (10)$$

где $\xi'_j \leq \xi_j$ ($j=1, \dots, n$).

Для построения вариантов подсистем с резервированием определим максимальную $\lambda_{j(l_j)}^*$ и минимальную $\lambda_{j(l_j)}^{**}$ кратности резервирования (соответственно, максимальное и минимальное число резервных элементов) для l_j -го типа j -й подсистемы. При этом будем использовать вычисленные при реализации процедуры Z постоянные для каждой подсистемы величины

$$\Delta g_p^j = g_p^* - g_p(v_{V(l)}^p \setminus U_j); \quad (11)$$

$$(p=1, \dots, Q; \quad j=1, \dots, n),$$

где $g_p(v_{V(l)}^p \setminus U_j)$ определяется (9).

Максимальная кратность резервирования $\lambda_{j(l_j)}^*$ для каждого элемента, вошедшего во множество U'_j , определяется по формуле

$$\lambda_{j(l_j)}^* = \min_{p=1, \dots, q} \left[\frac{\Delta g_p^j}{g_p(u_{j(l_j)})} - 1 \right], \quad (12)$$

где через $[a]$ обозначена целая часть a .

Действительно, если $\lambda_{j(l_j)} > \lambda_{j(l_j)}^*$, то справедливо соотношение (13) и хотя бы одно из ограничений (2) нарушается (здесь использовалось неравенство $[a+1] > a$, справедливое для любого a).

Аналогично, минимальная кратность резервирования $\lambda_{j(l_j)}^{**}$ для каждого элемента, вошедшего во множество U'_j , определяется соотношением (14).

Хотя всегда можно принять $\lambda_{j(l_j)}^{**} = 0$, но для уменьшения множества возможных вариантов системы с резервированием получим число различных кратностей резервирования $\left| \tilde{\lambda}_{j(l_j)} \right| = \lambda_{j(l_j)}^* - \lambda_{j(l_j)}^{**} + 1$ как можно меньшим.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^n (\lambda_{k(l_k)} + 1) g_p(u_{k(l_k)}) \geq \\
 & \geq (\lambda_{j(l_j)} + 1) g_p(u_{j(l_j)}) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n g_p(u_{k(l_k)}) \geq \\
 & \geq (\lambda_{j(l_j)}^* + 2) g_p(u_{j(l_j)}) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n g_p(u_{k(l_k)}) \geq
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & \geq \min_{p=1, \dots, q} \left[\frac{g_p^* - g_p(v_{V(l)}^p \setminus U_j)}{g_p(u_{j(l_j)})} + 1 \right] \times \\
 & \quad \times g_p(u_{j(l_j)}) + g_p(v_{V(l)}^p \setminus U_j) > \\
 & \quad > \min_{p=1, \dots, q} g_p^*, \\
 & \lambda_{j(l_j)}^{**} = \max_{p=q+1, \dots, Q} \left[\frac{\Delta g_p^j}{g_p(u_{j(l_j)})} - 1 \right].
 \end{aligned} \tag{14}$$

В случае, когда ограничения на минимально допустимые значения вероятности отсутствуют, то минимальную кратность резервирования можно определить следующим способом.

1. Прибавляют в j -й подсистеме по одному элементу того типа, который имеет максимальную надежность, до тех пор, пока, наконец, при добавлении очередного элемента не произойдет нарушение хотя бы одного из ограничений. Если же ограничения нарушаются сразу, то рассматривается следующий по надежности тип элементов.

2. Вычисляют значение надежности для построенной таким образом системы

$$P^* = \prod_{k=1}^n (1 - (1 - P_j(u_{k(l_k)}))^{\lambda_{k(l_k)} + 1}), \tag{15}$$

где $P_j(u_{k(l_k)})$, ($k \neq j$) – максимально возможная надежность, которой обладает один из типов элементов, использующийся в k -й подсистеме; $P_j(u_{j(l_j)})$ – надежность элемента l_j -го типа, использующегося в j -й

подсистеме; $\lambda_{j(l_j)}$ – количество резервных элементов j -й подсистемы l_j -го типа.

3. Из выражения $P^* \leq 1 - (1 - P_j(u_{j(l_j)}))^{\lambda_{j(l_j)}^{**} + 1}$ определяют $\lambda_{j(l_j)}^{**}$ – минимально возможное количество резервных элементов, необходимых для достижения надежности, равной P^* или более. Ясно, что максимум надежности будет достигаться для величин $\lambda_{j(l_j)}$, которые, по крайней мере, не меньше полученных величин $\lambda_{j(l_j)}^{**}$.

Если определенная таким образом или по формуле (14) минимальная кратность резервирования равна $\lambda_{j(l_j)}^{**}$ хотя бы для одного $j = 1, \dots, n$, то максимальная кратность резервирования $\lambda_{j(l_j)}^*$, определяемая формулой (12), может быть уточнена выражением (16).

Легко видеть, что $\bar{\lambda}_{j(l_j)}^* < \lambda_{j(l_j)}^*$. Аналогично можно уточнить минимальную кратность резервирования, определяемую формулой (14), при помощи известной максимальной кратности резервирования $\lambda_{j(l_j)}^*$

$$\bar{\lambda}_{j(l_j)}^* = \min_{p=1, \dots, q} \left[\frac{g_p^* - \sum_{k=1, k \neq j}^n (\lambda_{j(l_j)}^{**} + 1) g_p(u_{k(l_k)})}{g_p(u_{k(l_k)})} - 1 \right]. \quad (16)$$

Запишем теперь математическую модель задачи оптимального резервирования ("параллельного"):

$$P(v) = \prod_{j=1}^n P_j \left(u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \right) \rightarrow \max \quad (17)$$

при наличии ограничений (18), где наличие в варианте системы по (19) переменной $u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \in U_j^n$ означает, что в выбранном варианте системы в j -й подсистеме в качестве основного и резервных элементов выбраны элементы l_j -го типа и выбранная кратность резервирования равна

$\lambda_{j(l_j)}$, причем $\lambda_{j(l_j)}^{**} \leq \lambda_{j(l_j)} \leq \lambda_{j(l_j)}^*$,

$$g_p(v) = \sum_{j=1}^n g_p \left(u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \right) \leq g_p^* \quad (p=1, \dots, q),$$

$$g_p(v) = \sum_{j=1}^n g_p \left(u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \right) \geq g_p^* \quad (p=q+1, \dots, Q), \quad (18)$$

$$v \in V^n = \prod_{j=1}^n U_j^n, \quad u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \in U_j^n \quad (j=1, \dots, n),$$

$$v = \left(u_{1(l_1)}^{\lambda_{1(l_1)}}, \dots, u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}}, \dots, u_{n(l_n)}^{\lambda_{n(l_n)}} \right). \quad (19)$$

В ограничениях (18) слагаемые в левых частях, определяющие значение p -го ограничивающего фактора для j -й подсистемы (для основного и резервных элементов), перепишутся следующим образом

$$g_p \left(u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \right) = (\lambda_{j(l_j)} + 1) g_p(u_{j(l_j)}). \quad (20)$$

Вероятность безотказной работы j -й подсистемы в выражении (17) определяется в следующем виде

$$P_j \left(u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \right) = 1 - (1 - P_j(u_{j(l_j)}))^{\lambda_{j(l_j)} + 1}. \quad (21)$$

Множество возможных вариантов технической реализации j -й подсистемы с резервированием имеет вид

$$U_j^n = \left\{ \begin{array}{l} u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}} \mid l_j = 1, \dots, \xi'_j; \\ \lambda_{j(l_j)} = \lambda_{j(l_j)}^{**}, \dots, \lambda_{j(l_j)}^* \end{array} \right\}; \quad (22)$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

число элементов в этом множестве

$$|U_j^n| = \prod_{j=1}^n \sum_{l_j=1}^{\xi_j} (\lambda_{j(l_j)}^* - \lambda_{j(l_j)}^{**} + 2). \quad (23)$$

Задачу (17) – (18) перепишем следующим образом:
максимизировать

$$f(\bar{v}) = \sum_{j=1}^n f_j(\bar{u}_{j(t_j)}) \quad (24)$$

при условиях

$$g_p(\bar{v}) = \sum_{j=1}^n g_p(\bar{u}_{j(t_j)}) \leq g_p^* \quad (p = 1, \dots, q),$$

$$g_p(\bar{v}) = \sum_{j=1}^n g_p(\bar{u}_{j(t_j)}) \geq g_p^* \quad (p = q+1, \dots, Q), \quad (25)$$

$$\bar{v} \in \bar{V} = \prod_{j=1}^n \bar{U}_j, \quad \bar{u}_{j(t_j)} \in \bar{U}_j \quad (j = 1, \dots, n),$$

где $f(v) = \lg P(v)$; $\bar{U}_j = \left\{ \bar{u}_{j(t_j)} \mid t_j = 1, \dots, \sum_{l_j=1}^{\xi_j} \left(\left| \lambda_{j(l_j)} \right| + 1 \right) \right\}$ – множест-

во возможных вариантов j -й подсистемы; $|\bar{U}_j| = |U_j^n|$; $|\bar{V}| = |V^n|$.

Эта задача эквивалентна задаче (17), (18), поскольку логарифм является монотонным преобразованием.

Введение множеств \bar{U}_j является просто результатом замены переменной $u_{j(l_j)}^{\lambda_{j(l_j)}}$ на $\bar{u}_{j(t_j)}$ с соответствующим изменением множества значений.

Таким образом, были рассмотрены основные этапы алгоритма синтеза системы управления режимами энергосистемы по критерию надежности при требуемом уровне кибербезопасности для заданных экономических показателей. В процессе преобразований получены и уточнены соотношения для минимальной и максимальной кратности резервирования элементов.

Выводы. Сформулированы актуальные проблемы в области кибербезопасности электроэнергетических объектов, что становится важным в связи с появлением принципиально новых – цифровых подстанций. В свете дальнейшей реализации концепций SmartGrid и сетевцентрического управления, значение обозначенных проблем существенно возрастает при появлении виртуальных электростанций.

Среди аппаратных решений, обеспечивающих киберзащиту

современных энергосистем, предложено для их инфраструктуры управления вводить резервирование ключевых элементов с целью повышения надежности и тем самым, обеспечения необходимого уровня кибербезопасности.

В качестве реализации указанных решений используется алгоритм синтеза системы управления режимами энергосистемы по критерию надежности при требуемом уровне кибербезопасности для заданных экономических показателей.

Основные результаты исследований показывают, что задача синтеза системы управления режимами энергосистемы по критерию надежности имеет экстремум, математическая модель задачи учитывает параллельное резервирование и эквивалентна задаче нахождения максимума логарифмической функции. Таким образом, может быть получен требуемый уровень кибербезопасности. Доказана справедливость предложенных соотношений для максимальной и минимальной кратности резервирования. Эти соотношения уточнены для случаев наличия и отсутствия ограничений на минимально допустимые значения вероятностей безотказной работы элементов энергосистемы. Также предложена процедура последовательного отсева элементов, которые учитывать в дальнейшем нет необходимости.

Список литературы: 1. *Воропай Н.И.* Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / *Н.И. Воропай, В.А. Стенников* // Известия РАН. Энергетика, 2014. – № 1. – С. 64-73. 2. *Кобец Б.Б.* Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / *Б.Б. Кобец, И.О. Волкова.* – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с. 3. *Марков А.С.* Корпоративные информационные системы управления событиями информационной безопасности / *А.С. Марков, Ю.В. Рауткин, А.А. Фадин* // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции. – Иркутск, 2013. – С. 412-416. 4. *Осак А.Б.* Влияние человеческого фактора при обеспечении кибербезопасности на надежность объектов электроэнергетики и живучесть электроэнергетических систем / *А.Б. Осак, Е.Я. Бузина* // Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. – 2015. – № 12-2. – С. 174-179. 5. *Массель Л.В.* Киберопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России / *Л.В. Массель, Н.И. Воропай, С.М. Сендеров* // Вопросы кибербезопасности. – 2016. – № 4 (17). – С. 2-10. 6. *Безкорвайный М.М.* Кибербезопасность – подходы к определению понятия / *М.М. Безкорвайный, А.Л. Татузов* // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – № 1 (2). – С. 22-27. 7. *Shvets S.V.* The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism / *Y.I. Sokol, O.G. Gryb, S.V. Shvets, [et al.]* // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – № 4. – P. 61-65. 8. *Shvets S.V.* Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes / *Y.I. Sokol, O.G. Gryb, S.V. Shvets, [et al.]* // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – № 3. – P. 67-71. 9. *Швец С.В.* Мережецентричні аспекти використання безпілотних літальних апаратів / *С.В. Швец, В.Г. Воропай* // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 176 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2016. – С. 33-34. 10. *Осак А.Б.* Кибербезопасность объектов электроэнергетики. Угрозы и возможные

последствия / А.Б. Осака, Д.А. Панасецкий, Е.Я. Бузина // Сборник докладов XXII конференции "Релейная защита и автоматика энергосистем". – Москва. – 2014. – С. 417-423.

References:

1. Voropaj, N.I., and Stennikov, V.A. (2014), "Integrated intelligent power systems", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, No. 1, pp.64-73.
2. Kobets, B.B., and Volkova, I.O. (2010), *Innovative development of electric power industry on the basis of the concept Smart Grid*, IAC Energy, Moscow, 208 p.
3. Markov, A.S., Rautkin, Yu.V., and Fadin, A.A. (2013), "Corporate information systems for managing information security events", *Proceedings of the XVIII Baikal All-Russian Conference*, Irkutsk, pp. 412-416.
4. Osak, A.B., and Buzina, E.Ya. (2015), "Influence of the human factor while ensuring cybersecurity on the reliability of electric power facilities and the survivability of electric power systems", *Institute of Power Systems. L. A. Melentieva, SB RAS*, No. 12-2, pp. 174-179.
5. Massel, L.V., Voropai, N.I., and Senderov, S.M., (2016), "Cyber security as one of the strategic threats to Russia's energy security", *Cybersecurity issues*, No.4 (17), pp. 2-10.
6. Bezkorovainiy, M.M., and Tatuzov, A.L., (2014), "Cybersecurity-approaches to the definition of the concept", *Cybersecurity issues*, No. 1 (2), pp. 22-27.
7. Shvets, S.V., Sokol, Y.I., Gryb, O.G., Sirotin, Yu.O., Iierusalimova, T.S., and Gapon, D.A. (2017), "The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism", *Electrical engineering & electromechanics*, No. 4, pp. 61-65.
8. Shvets, S.V., Sokol, Y.I., Gryb, O.G., Sirotin, Yu.O., Iierusalimova, T.S., and Gapon D.A. (2017), "Network-centric technologies for control of three-phase network operation modes", *Electrical engineering & electromechanics*, No. 3, pp. 67-71.
9. Shvets, S.V., and Voropaj, V.G. (2016), "Network-centric aspects of the use of unmanned aerial vehicles", *Bulletin of the Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko. Technical sciences*, No.176 "Problems of energy supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine", pp. 33-34.
10. Osak, A.B., Panasety, D.A., and Buzina, E.Ya. (2014), "Cybersecurity of electric power facilities. Threats and possible consequences", *Collection of reports of the XXII conference "Relay Protection and Automation of Power Systems"*, Moscow, 2014, pp. 417-423.

Статью представил д-р техн. наук, проф., профессор кафедры "Автоматизации и кибербезопасности энергосистем" НТУ "ХПИ" Сендерович Г.А.

Поступила (received) 28.11.2017

Gryb Oleg, Dr. Sci. Tech, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (050) 139-24-39, e-mail: oleg47gryb@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4758-8350

Shvets Sergey, Cand. Sci. Tech, Associate Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (067) 768-08-38, e-mail: se55sh32@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-3716-141X

Bortnikov Alexander, Postgraduate Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (067)-900-76-48, e-mail: a42km@ya.ru
ORCID ID: 0000-0002-5235-499X

УДК 004.032

Синтез елементів енергосистеми за критерієм надійності в умовах кібербезпеки / Гриб О.Г., Швець С.В., Бортніков О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 97 – 110.

Серед апаратних рішень кіберзахисту сучасних енергосистем запропоновано в їх інфраструктурі управління вводити резервування ключових елементів для підвищення надійності і тим самим, забезпечення необхідного рівня кібербезпеки. Отримані співвідношення кратності резервування елементів для випадків наявності і відсутності обмежень на мінімально допустимі значення ймовірностей їх безвідмовної роботи. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: енергосистема; резервування; надійність; кібербезпека; інфраструктура управління.

УДК 004.032

Синтез элементов энергосистемы по критерию надежности в условиях кибербезопасности / Гриб О.Г., Швець С.В., Бортников А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 97 – 110.

Среди аппаратных решений киберзащиты современных энергосистем предложено в их инфраструктуре управления вводить резервирование ключевых элементов для повышения надежности и тем самым, обеспечения необходимого уровня кибербезопасности. Получены соотношения кратности резервирования элементов для случаев наличия и отсутствия ограничений на минимально допустимые значения вероятностей их безотказной работы. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: энергосистема; резервирование; надежность; кибербезопасность; инфраструктура управления.

UDC 004.032

Synthesis of power system elements by the criterion of reliability in conditions of cybersecurity / Gryb O.G., Shvets S.V., Bortnikov A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 97 – 110.

Among the hardware solutions for cybersecurity of modern power systems, it is proposed in their management infrastructure to introduce redundancy of key elements to increase reliability and thereby ensure the necessary level of cybersecurity. We have obtained the ratio of the multiplicity of the reservation of elements for the cases of presence and absence of restrictions on the minimum permissible values of the probabilities of their trouble-free operation. Refs.: 10 titles.

Keywords: power system; redundancy; reliability; cybersecurity; management infrastructure.

***Новые средства информатики и
искусственного интеллекта***

А.А. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики, НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СВЕРТОЧНЫХ АВТОЭНКODЕРОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ В НАБОРАХ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе проведен процесс моделирования обучения без учителя сверточных автоэнкодеров для выделения признаков в наборах стереопар. Исследовано влияние количества обучаемых фильтров и топологии автоэнкодера на точность восстановления изображений. Определены конфигурации автоэнкодеров для точного восстановления входных изображений. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: обучение без учителя; сверточный автоэнкодер; выделение признаков; стереопара; восстановление изображений.

Постановка проблемы. В задачах восстановления трехмерных моделей сцены по наборам стереоизображений важным этапом является выделение ключевых точек на каждом изображении стереопары. Существующие алгоритмы обработки и выделения признаков требуют проводить предварительную обработку изображений. В то же время, в последние годы происходит стремительное развитие моделей искусственных нейронных сетей, в частности, сверточных нейронных сетей [1, 2], в которых процессы предварительной обработки и выделения признаков являются следствием их механизма работы. Однако, в работе таких сетей необходимо наличие пар "обучающий пример – желаемый выход сети", что в случае стереоизображений приводит к необходимости предварительного выделения карт глубины. Это требует дополнительного проведения процесса калибровки камеры с целью определения внешних и внутренних параметров камеры. Соответственно, если исключить данный процесс из технологической цепочки при восстановлении трехмерной сцены, то возможно существенное упрощение вычислений. Данный подход предлагается реализовать с помощью метода обучения без учителя, который требует только наличия обучающих примеров.

Анализ последних исследований. Одним из методов обучения без учителя является автоэнкодер [3], который позволяет эффективно находить зависимости во входных данных. В данной работе рассматриваются модели так называемых сверточных автоэнкодеров [4], которые в большей степени подходят для задач обработки изображений. Важным свойством этого класса нейронных сетей является то, что в

процессе обучения в скрытых слоях формируются сжатые представления входных данных [5, 6], что позволяет, например, проводить очистку изображений от шума [7] или проводить генерацию новых изображений [8]. В работах [9, 10] показано применение автоэнкодеров при восстановлении карт глубины по одиночным изображениям, приводятся варианты функции потерь для оценки качества восстановления. В работе [11] было проведено исследование влияния параметров топологии многослойного персептрона на его работу, были выявлены ключевые параметры, влияющие на сходимость обучения персептрона, предложенный подход может быть применен и для сверточных нейронных сетей. В работе [12] при исследовании сверточных нейронных сетей было установлено, что наращивание глубины сети, при относительно небольшом количестве используемых фильтров свертки, и совместно с использованием слоев субдискретизации приводит к улучшению качества классифицированных изображений при сниженной вычислительной нагрузке.

Цель работы. Изучение влияния параметров и топологии сверточного автоэнкодера на процесс выделения признаков при обучении без учителя.

Методология исследования. Исследовалась работа 5 различных топологий сверточных автоэнкодеров сетей для решения задачи восстановления входного изображения. Основные параметры разработанных моделей приведены в табл. 1. В качестве обучающего набора данных был использован набор "Middlebury Stereo 2014" [13], который содержит стереопары изображений, карты глубин, а также калибровочные параметры камеры (рис. 1). Так как данный набор содержит изображения достаточно больших размеров, то было проведено расширение набора путем вырезания из исходных изображений участков меньшего размера (128×128 пикселей) в случайных местах, таким образом из 23 исходных изображений набора были получены обучающая выборка из 1380 изображений и тестовая выборка из 920 изображений.

Для каждой модели проводилось 30 итераций обучения. Затем процесс обучения повторялся два раза, каждый раз с новой обучающей выборкой. После каждого из этапов проводилось тестирование на тестовой выборке. Оценка производилась как среднеквадратичное отклонение исходных данных от восстановленных. Результаты обучения для разработанных моделей приведены в табл. 1. На рис. 2 показаны примеры исходного и восстановленных изображений для всех моделей.

Таблиця

Параметри разработанных моделей и точность восстановления входных изображений

Номер модели	Архитектура, размерность входов, карт признаков и выходов, число обучаемых параметров	Точность
Общая архитектура моделей 1-4 Conv-Pool-Conv-Pool-Conv- DeConv-UpSamp-DeConv-UpSamp-DeConv ¹		
1	(128;3) ² -(124;16)-(62;16)-(60;16)-(30;16)-(28;16)-(30;16)-(60;16)-(62;16)-(124;16)-(128;3), 11699	50.01
2	(128;3)-(124;16)-(62;16)-(60;16)-(30;16)-(28;1)-(30;16)-(60;16)-(62;16)-(124;16)-(128;3), 7364	674.58
3	(128;3)-(124;32)-(62;32)-(60;32)-(30;32)-(28;3)-(30;32)-(60;32)-(62;32)-(124;32)-(128;3), 25094	74.42
4	(128;3)-(124;8)-(62;8)-(60;8)-(30;8)-(28;3)-(30;8)-(60;8)-(62;8)-(124;8)-(128;3), 2822	179.28
Архитектура модели 5 Conv-Pool-Conv-Pool-Conv-Pool-Conv- DeConv-UpSamp-DeConv-UpSamp-DeConv-UpSamp-DeConv		
5	(128;3)-(124;16)-(62;16)-(60;16)-(30;16)-(28;16)-(14;16)-(12;3)-(14;16)-(28;16)-(30;16)-(60;16)-(62;16)-(124;16)-(128;3), 12582	820.74
¹ - Conv – сверточный блок; Pool – слой субдискретизации; DeConv – слой развертки; UpSamp – слой увеличения размерности в 2 раза; ² - Размерность – 3 карты признаков размером 128×128 пикселей.		



Рис. 1. Примеры изображения и соответствующей карты глубины

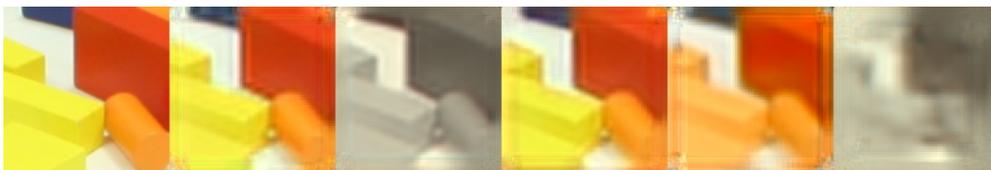


Рис. 2. Результаты восстановления. Слева-направо: входное изображение, модели 1-5

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Из исследования можно увидеть, что:

- автоэнкодеры восстанавливают входное изображение путем сжимающего преобразования, за счет которого происходит выделение существенных признаков;

- рост числа фильтров в слоях свертки не приводит к существенному увеличению точности, но приводит к существенному росту количества вычислений (модель № 3), обратное также является верным (модель № 4);

- при низких размерностях карт признаков на границе кодирующей и декодирующей частей существенно ухудшается точность решения, что можно увидеть на примерах моделей № 2 и № 5, в которых, кроме снижения качества восстановленного изображения, теряется также и информация о цвете;

- автоэнкодер показывает эффективные результаты даже при небольшой глубине сети, что повышает скорость обработки изображений.

Это подтверждают результаты модели № 1, которая при относительно небольшом количестве обучаемых параметров продемонстрировала наилучшие результаты после 90 итераций обучения на тестовых данных. При этом модель № 3 демонстрирует практически такой же результат, как и модель № 1, но имеет при этом в два раза большее число обучаемых весов, что отражается на скорости ее вычислений.

В качестве важного направления дальнейших исследований представляется моделирование автоэнкодеров, которые будут обрабатывать два изображения стереопары за один проход и восстанавливать на выходах карту глубин сцены.

Список литературы: 1. *LeCun Y.* Gradien-based learning applied to document recognition / *Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner* // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86. – Issue 11. – P. 2278-2324. 2. *Krizhevsky A.* ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks / *A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton*. // NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2012. – P. 1097-1105. 3. *Hinton G.* Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks / *G. Hinton, R. Salakhutdinov* // Science. – 2006. – Vol. 313. – № 5786. – P. 504-507. 4. *Masci J.*

Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction / *J. Masci, U. Meier, D. Cireşan, J. Schmidhuber* // In Proceedings of the 21th international conference on Artificial neural networks (ICANN'11). – 2011. – Vol. – Part I. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. – P. 52-59. **5.** *Adams R.P.* On Nonparametric Guidance for Learning Autoencoder Representations / *R.P. Adams, H. Larochelle, J. Snoek* // Proceedings of Machine Learning Research. – 2012. – Vol. 22: AISTATS. – P. 1073-1080. **6.** *Makhzani A.* Winner-Take-All Autoencoders / *A. Makhzani, B. Frey* // NIPS'15 Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2015. – Vol. 2. – P. 2791-2799. **7.** *Stowell D.* Denoising without access to clean data using a partitioned autoencoder / *D. Stowell, R. Turner* // CoRR, abs/1509.05982. – 2015. **8.** *Brox T.* Generating Images with Perceptual Similarity Metrics based on Deep Networks / *T. Brox, A. Dosovitskiy* // NIPS'16 Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2016. – P. 658-666. **9.** *Carneiro G.* Unsupervised CNN for Single View Depth Estimation: Geometry to the Rescue / *G. Carneiro, R. Garg, B.G. Kumar, I.D. Reid* // European Conference on Computer Vision 2016: Computer Vision – ECCV. – 2016. – P. 740-756. **10.** *Bernard F.* MoFA: Model-based Deep Convolutional Face Autoencoder for Unsupervised Monocular Reconstruction / *F. Bernard, P. Garrido, H. Kim, P. Pérez, A. Tewari, C. Theobalt, M. Zollhöfer* // CoRR, abs/1703.10580. – 2017. **11.** *Дашкевич А.О.* Дослідження багатопарових нейронних мереж для автоматичного виділення ознак при вирішенні задачі розпізнавання образів / *А.О. Дашкевич* // Науковий вісник ТДАТУ. – Мелітополь: ТДАТУ. – 2016. – Вип. 6. – Т. 2. – С. 134-139. **12.** *Дашкевич А.А.* Исследование архитектуры сверточных нейронных сетей для решения задачи классификации изображений / *А.А. Дашкевич* // Системы обработки информации. – Харьков: ХНУПС ім. І. Кожедуба. – 2017. – Вип. 4 (150). – С. 109-112. **13.** *Scharstein D.* High-resolution stereo datasets with subpixel-accurate ground truth / *D. Scharstein, H. Hirschmüller, Y. Kitajima, G. Krathwohl, N. Nesić, X. Wang, P. Westling* // GCPR. – 2014. – Vol. 8753 of Lecture Notes in Computer Science. – P. 31-42.

References:

1. LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P. (1998), "Gradient-based learning applied to document recognition". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, Issue 11, Nov. 1998, pp. 2278 - 2324.
2. Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G.E. (2012), "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks". *NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems*, pp. 1097-1105.
3. Hinton, G.E. and Salakhutdinov, R.R. (2006), "Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks", *Science*, 28 July 2006, Vol. 313, No. 5786, pp. 504-507.
4. Masci, J., Meier, U, Cireşan, D. and Schmidhuber, J. (2011), "Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction". *In Proceedings of the 21th international conference on Artificial neural networks (ICANN'11)*, Vol. Part I, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 52-59.
5. Adams, R.P., Larochelle, H. and Snoek, J. (2012), "On Nonparametric Guidance for Learning Autoencoder Representations". *Proceedings of Machine Learning Research*, Vol. 22: AISTATS, pp. 1073-1080.
6. Makhzani, A. and Frey, B. (2014), "Winner-Take-All Autoencoders", *NIPS'15 Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Vol. 2, pp. 2791-2799.
7. Stowell, D. and Turner, R. (2015), Denoising without access to clean data using a partitioned autoencoder. CoRR, abs/1509.05982.

8. Brox T. and Dosovitskiy A. (2016), "Generating Images with Perceptual Similarity Metrics based on Deep Networks", *NIPS'16 Proceedings of the 29th International Conference on Neural Information Processing Systems*, pp. 658-666.
9. Carneiro, G., Garg, R., Kumar, B.G. and Reid, I.D. (2016), "Unsupervised CNN for Single View Depth Estimation: Geometry to the Rescue". *European Conference on Computer Vision 2016: Computer Vision – ECCV*, pp 740-756.
10. Bernard, F., Garrido, P., Kim, H., Pérez, P., Tewari, A., Theobalt, C. and Zollhöfer, M. (2017), "MoFA: Model-based Deep Convolutional Face Autoencoder for Unsupervised Monocular Reconstruction", *CoRR*, abs/1703.10580.
11. Dashkevich, A.A. (2016), "Study of multilayer neural networks for automatic feature extraction in solving the problem of pattern recognition. Scientific bulletin of the Tavria agrotechnological state university", Is. 6, Vol. 2, pp. 134-139.
12. Dashkevich, A.A. (2017), "Study of convolutional neural networks models for solving the problem of image classification", *Information Processing Systems*, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Is. 4 (150), pp. 109-112.
13. Scharstein, D., Hirschmüller, H., Kitajima, Y., Krathwohl, G., Nescic, N., Wang, X., and Westling, P. (2014), "High-resolution stereo datasets with subpixel-accurate ground truth", *GCPR*, Vol. 8753 of Lecture Notes in Computer Science, pp 31-42.

Статью представил д-р техн. наук, проф. Національного технічного університету "Харьковский политехнический институт" А.Ю. Ницын

Поступила (received) 24.11.2017

Dashkevich Andrey, Cand. Tech. Sci.
National Technical University "KhPI",
Str. Кургучова, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: (095) 388-04-56, e-mail: dashkevich.a@gmail.com
ORCID ID:0000-0002-9963-0998

УДК 004.93

Дослідження моделей згорткових автоенкодерів для виділення ознак в наборах стереозображень / Дашкевич А.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 112 – 118.

В роботі проведено процес моделювання навчання без вчителя згорткових автоенкодерів для виділення ознак в наборах стереопар. Досліджено вплив кількості фільтрів, що навчаються і топології автоенкодера на точність відновлення зображень. Визначені конфігурації автоенкодерів з високою якістю відновлення. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: навчання без вчителя; згортковий автоенкодер; виділення ознак; стереопара; відновлення зображень.

УДК 004.93

Исследование моделей сверточных автоэнкодеров для выделения признаков в наборах стереоизображений / Дашкевич А.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 112 – 118.

В работе проведен процесс моделирования обучения без учителя сверточных автоэнкодеров для выделения признаков в наборах стереопар. Исследовано влияние количества обучаемых фильтров и топологии автоэнкодера на точность восстановления изображений. Определены конфигурации автоэнкодеров с высокой точностью восстановления. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: обучение без учителя; сверточный автоэнкодер; выделение признаков; стереопара; восстановление изображений.

UDC 004.93

Study of convolutional autoencoder models for feature extraction from stereo image sets / Dashkevich A.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 112 – 118.

The modeling process of convolutional autoencoder unsupervised learning for feature extraction from stereo images sets is provided. The number of learning filters and topology of autoencoder influence on quality of image reconstruction is researched. Autoencoder configurations of high efficiency reconstruction is defined. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 13 titles.

Keywords: unsupervised learning, convolutional autoencoder; feature extraction; stereo images sets; image reconstruction.

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
А.Ю. ЗАКОВОРТНЫЙ, д-р техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",
С.Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ"

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ХЕММИНГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕШЕНИЯМИ

В статье изложены результаты анализа особенностей функционирования дискретной нейронной сети Хемминга, которая не может распознавать входные черно-белые изображения, находящиеся на одинаковом минимальном расстоянии от двух или большего числа эталонных изображений. Проанализированы недостатки нейронных сетей, использующих расстояние Хемминга и решающих эту задачу для изображений, находящихся на границах двух или трех классов изображений. Предложена модификация нейронной сети Хемминга, распознающей изображения на границах нескольких классов. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: нейронная сеть Хемминга; эталонные изображения; изображения на границах нескольких классов.

Постановка проблемы и анализ литературы. При распознавании изображений с помощью нейронных сетей почти всегда получают одно решение даже в тех случаях, когда имеется несколько равноценных решений. Это объясняется тем, что во многих нейронных сетях, например, в перцептронах, сетях Ворда, ассоциативной памяти, нейронных сетях Элмана, Кохонена и др. [1 – 4] решение определяется не одним, а множеством выходных нейронов. В случае, если в нейронной сети решение определяется единственным выходным нейроном, имеется потенциальная возможность получения нескольких решений (нескольких реакций сети на входное изображение) [5 – 8]. Такая потенциальная возможность есть у нейронной сети Хемминга [1, 2, 6], изображенной на рис. 1. Сеть имеет четыре слоя нейронов:

1. Входной слой S -нейронов, на входы которых подаются биполярные m -разрядные векторы: $D_1 = (d_{11}, \dots, d_{1m}), \dots, D_h = (d_{h1}, \dots, d_{hm}), \dots, D_r = (d_{r1}, \dots, d_{rm})$.

2. Слой Z -нейронов, имеющих функции активации $g_2(U_{\text{ВХ}})$, описываемые соотношением

$$g_z(U_{\text{ВХ}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{ВХ}} \leq 0, \\ k_1 U_{\text{ВХ}}, & \text{если } 0 \leq U_{\text{ВХ}} \leq U_{\text{П}}, \\ U_{\text{П}}, & \text{если } U_{\text{ВХ}} > U_{\text{П}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{\text{ВХ}}$ – входной сигнал нейрона Z -слоя; $k_1, U_{\text{П}}$ – константы.

Элементы Z -слоя рассчитывают свои входные сигналы по формуле

$U_{вхZi} = m/2 + \sum_{k=1}^m d_{hk} w_{ki} = m/2 + \sum_{k=1}^m d_{hk} z_{ik}$, где $U_{вхZi}$ – входной сигнал нейрона Z_i ($i = \overline{1, n}$), определяемый с помощью функции активации (1); n – число элементов Z -слоя; $D_h = (d_{h1}, \dots, d_{hm})$ – биполярный m -разрядный входной вектор; (z_{i1}, \dots, z_{im}) – m -разрядный вектор, хранимый в весах связей нейрона Z_i ($i = \overline{1, n}$); w_{ki} – вес связи между нейронами S_k и Z_i .

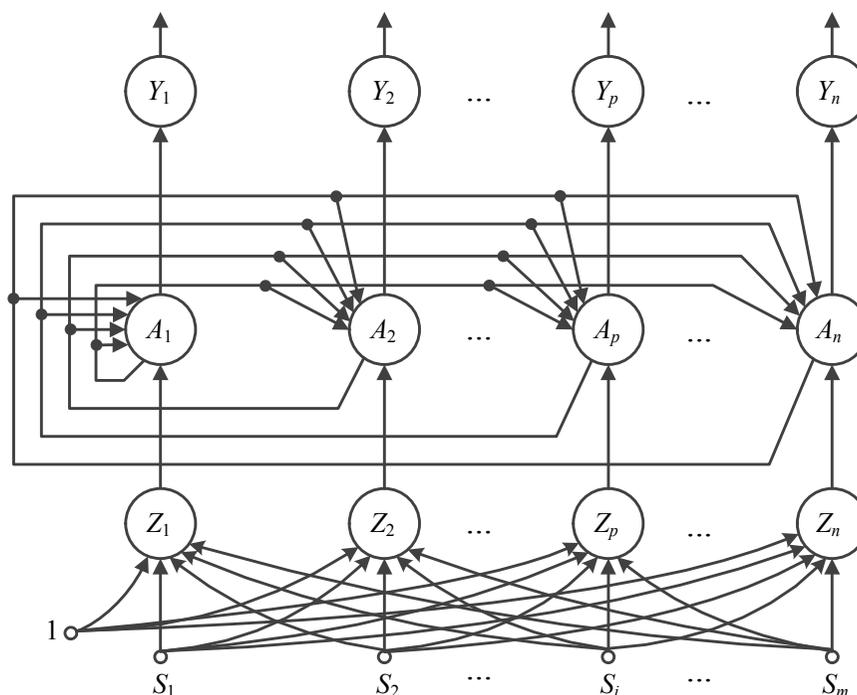


Рис. 1. Нейронная сеть Хемминга

3. Слой A -нейронов, с помощью которого выделяется максимальный сигнал $a_{i \max}$ с выходов Z -нейронов. Слой A -нейронов функционирует циклически. Динамика изменения выходных сигналов A -нейронов $U_{выхAi}$ ($i = \overline{1, n}$) описывается итерационным выражением

$$U_{выхAj}(t+1) = g(U_{вхAj}) = g(U_{выхAj}(t) - (\varepsilon \sum_{k=1, k \neq j}^n U_{выхAk}(t))), \quad j = \overline{1, n} \quad (2)$$

при начальных условиях

$$U_{\text{вх}A_j}(0) = U_{\text{вх}Z_j}, \quad j = \overline{1, n},$$

где $g(U_{\text{вх}A_j})$ – функция активации нейрона A_j ; ε – положительная константа, удовлетворяющая неравенствам $0 < \varepsilon \leq 1/n$.

При этом функции активации A -элементов и веса их связей задаются следующими соотношениями:

$$g(U_{\text{вх}A_j}) = \begin{cases} U_{\text{вх}A_j}, & \text{если } U_{\text{вх}A_j} > 0, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}A_j} \leq 0, \end{cases}$$

$$w_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если } k = j, \\ -\varepsilon, & \text{если } k \neq j, \quad k, j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

Если среди выходных сигналов $U_{\text{вх}Z_i}$ ($i = \overline{1, n}$) имеется один наибольший сигнал $U_{\text{вх}Z_i} = \max_i U_{\text{вх}Z_i}$, в результате итерационного процесса в слое A -элементов останется только один нейрон A_j с положительным выходным сигналом.

4. Слой Y -элементов – слой выходных нейронов сети Хемминга, которые имеют функции активации вида

$$g_Y(U_{\text{вх}}) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}} > 0, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}} \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Если в слое A -элементов останется только один нейрон A_j с положительным выходным сигналом $U_{\text{вх}A_j}$, то и на выходе нейронной сети Хемминга только один нейрон Y_j будет иметь единичный сигнал на своем выходе, что и будет указывать на то, что входной вектор наиболее близок по расстоянию Хемминга к вектору, хранящемуся в весах связей нейрона Z_j .

Однако, если входной вектор сети Хемминга находится на одинаковом минимальном расстоянии Хемминга от двух или более эталонных векторов, хранящихся в весах связей нейронов Z -слоя, то слой A -нейронов не может выделить единственный максимальный сигнал и в результате его функционирования на выходах всех A - и Y -нейронов появятся нулевые сигналы.

Этот заметный недостаток нейронной сети Хемминга был преодолен в работах [6, 9], в которых описана нейронная сеть, использующая расстояние Хемминга и позволяющая выделять эталонные вектора, которые находятся на одинаковом расстоянии

Хемминга от двух или трех векторов, хранящихся в памяти сети. Недостаток предложенной разработки – заметное усложнение сети при увеличении число d ($d \geq 3$) эталонных векторов, находящихся на одинаковом минимальном расстоянии Хемминга от входного вектора.

Цель статьи – разработка нейронной сети, использующей расстояние Хемминга и распознающей изображения, находящиеся на минимальном расстоянии Хемминга от одного до k эталонных изображений, хранящихся в весах связей нейронной сети, при однотипной архитектуре сети при любом $k \geq 2$.

Основная часть. Архитектура нейронной сети, использующей расстояние Хемминга и способной распознавать изображения, находящиеся на минимальном расстоянии Хемминга от одного, двух, трех и четырех эталонных изображений, хранящихся в памяти нейронной сети, приведена на рис. 2. Перед началом распознавания входного изображения все нейроны сети по цепям установки нейронов в ноль переводятся в пассивное состояние.

Нейроны Σ_k , $k = \overline{1, 4}$ имеют функцию активации вида

$$U_{\text{вых}\Sigma k} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma k} = k, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma k} \neq k, \end{cases} \quad (4)$$

то есть на выходе нейрона Σ_4 появляется единичный выходной сигнал только в том случае, когда на выходах любых четырех нейронов Y -слоя имеются единичные выходные сигналы. Эти сигналы появляются в случае, если в результате итерационного процесса в A -слое осталось только четыре A -нейрона с ненулевыми выходными сигналами, которые по соотношению (3) обеспечивают единичные выходные сигналы на выходах соответствующих Y -нейронов, например Y_{k1} , Y_{k2} , Y_{k3} , Y_{k4} .

Нейроны слоя Y^1 имеют функции активации вида

$$U_{\text{вых}Y^1} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}Y^1} \geq 2, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}Y^1} < 2. \end{cases} \quad (5)$$

Поэтому единичные выходные сигналы нейронов Y_{k1} , Y_{k2} , Y_{k3} , Y_{k4} и Σ_k переводят нейроны Y_{k1}^1 , Y_{k2}^1 , Y_{k3}^1 , Y_{k4}^1 в состояние с единичным выходным сигналом. Все остальные нейроны этого слоя будут иметь нулевые выходные сигналы. Единичные выходные сигналы с выходов нейронов Y_{k1}^1 , Y_{k2}^1 , Y_{k3}^1 , Y_{k4}^1 по цепям обратных связей фиксируют единичные выходные сигналы этих нейронов. Если в

результате итерационного процесса в слое A -элементов на выходах A -нейронов A_{k1} , A_{k2} , A_{k3} , A_{k4} одновременно появятся нулевые выходные сигналы, то единичные сигналы на выходах нейронов Y_{k1}^1 , Y_{k2}^1 , Y_{k3}^1 и Y_{k4}^1 будут указывать на то, что входное изображение находится на одинаковом минимальном расстоянии Хемминга от четырех эталонных изображений, хранящихся в весах связей нейронов Z_{k1} , Z_{k2} , Z_{k3} , Z_{k4} . Если сигналы на выходах нейронов A_{k1} , A_{k2} , A_{k3} , A_{k4} не все одинаковы, тогда при продолжении итерационного процесса в слое A -нейронов возможно появление следующих трех ситуаций:

1. Три из четырех выходных сигналов $U_{\text{вых}Ak1}$, $U_{\text{вых}Ak2}$, $U_{\text{вых}Ak3}$, $U_{\text{вых}Ak4}$ становятся одновременно нулевыми. Без потери общности можно положить, что $U_{\text{вых}Ak1} = 1$, $U_{\text{вых}Ak2} = U_{\text{вых}Ak3} = U_{\text{вых}Ak4} = 0$. В этом случае только один нейрон Y_{k1} слоя Y -нейронов будет иметь единичный выходной сигнал, который переведет нейрон Σ_1 в активное состояние. Единичный выходной сигнал нейрона Σ_1 поступит на входы установки в ноль всех нейронов Y^1 -, Y^2 -, Y^3 -слоев и нейронов Σ_2 , Σ_3 , Σ_4 , Σ_5 и Σ_6 . Установка в ноль большей части этих нейронов (за исключением нейронов Y_{k2}^1 , Y_{k3}^1 , Y_{k4}^1) является излишней, но если перед этим выходные сигналы A -нейронов $U_{\text{вых}Ak2}$, $U_{\text{вых}Ak3}$, $U_{\text{вых}Ak4}$ обнулялись не одновременно, а последовательно, то необходим сброс в ноль и нейроны слоев Y^2 или Y^3 . Для упрощения алгоритма функционирования нейронной сети здесь и далее сигналы установки в ноль подаются на входы всех нейронов слоев Y^1 , Y^2 , Y^3 и нейроны Σ_2 , ..., Σ_6 .

В данном случае входное изображение находится на минимальном расстоянии Хемминга только от одного эталонного изображения, хранящегося в весах связей нейрона Z_{k1} .

2. Два из четырех выходных сигналов $U_{\text{вых}Ak1}$, $U_{\text{вых}Ak2}$, $U_{\text{вых}Ak3}$, $U_{\text{вых}Ak4}$ во время итерационного процесса в слое A -нейронов одновременно становятся нулевыми. В этом случае два нейрона Y -слоя будут иметь единичные выходные сигналы. Функционирование нейронной сети в этой ситуации будет рассмотрено далее.

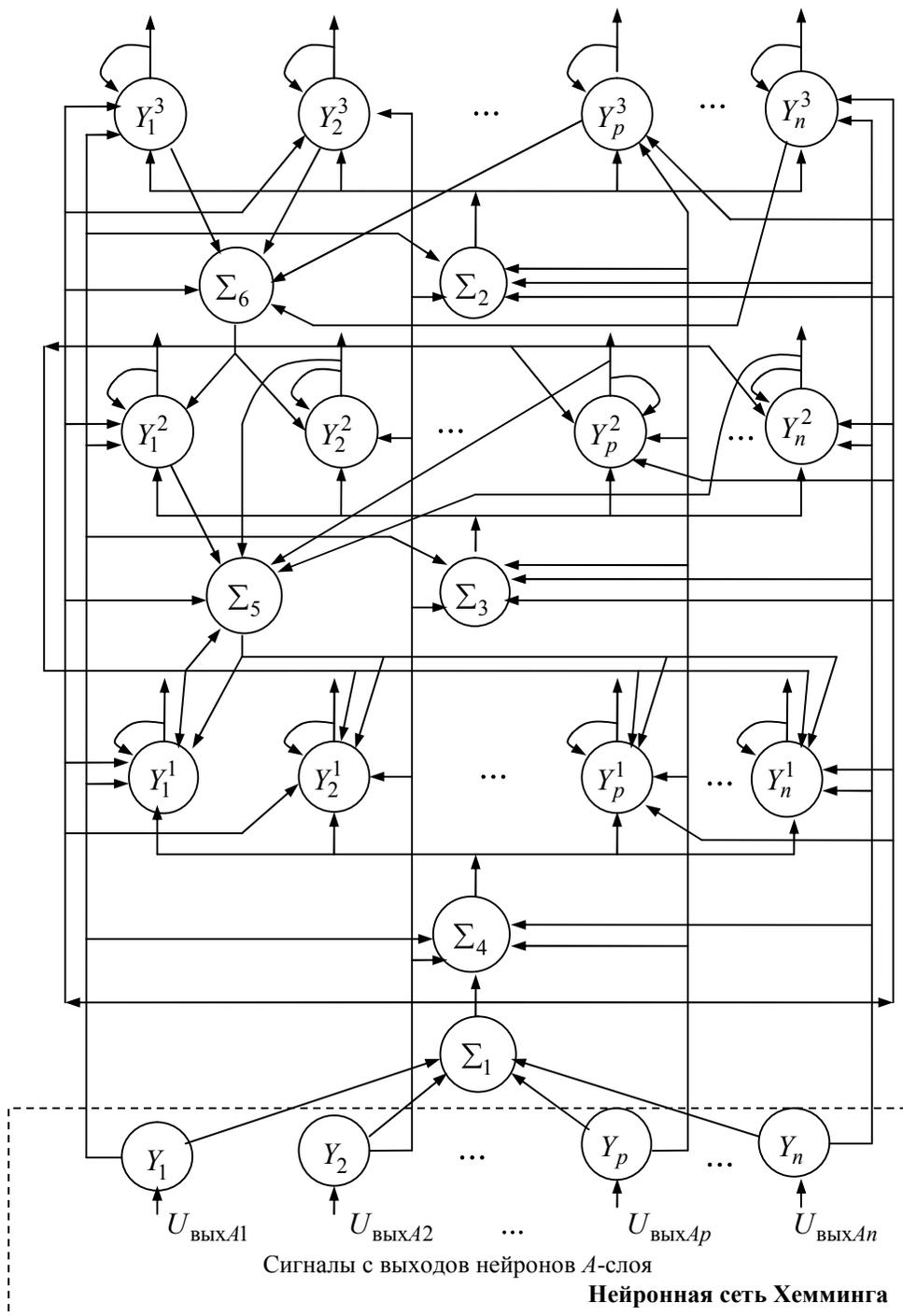


Рис. 2. Нейронная сеть для распознавания изображений, находящихся на минимальном расстоянии Хемминга от одного до четырех эталонных изображений

3. Один из четырех выходных сигналов $U_{\text{вых}Ak1}$, $U_{\text{вых}Ak2}$, $U_{\text{вых}Ak3}$, $U_{\text{вых}Ak4}$ становится нулевым. Без потери общности можно положить, что $U_{\text{вых}Ak4} = 0$. В этом случае три единичных сигнала с выходов нейронов Y -слоя переводят нейрон Σ_3 , имеющий функцию активации вида (4) при $k = 3$, в единичное состояние. Поскольку нейроны Y^2 -слоя имеют такие же функции активации (5), что и нейроны слоя Y^1 , то единичные выходные сигналы нейронов Y_{k1} , Y_{k2} , Y_{k3} , и Σ_3 переводят нейроны Y_{kj}^2 ($j = 1, 2, 3$) в активное состояние. Единичные выходные сигналы элементов Y_{kj}^2 ($j = 1, 2, 3$) по цепям обратных связей фиксируют свои единичные выходные сигналы и переводят в пассивное состояние все нейроны Y^1 -слоя с помощью нейрона Σ_5 , который имеет функцию активации вида

$$U_{\text{вых}\Sigma_5} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}} \geq 1, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}} < 1. \end{cases} \quad (6)$$

Единичные выходные сигналы нейронов Y_{kj}^2 ($j = 1, 2, 3$) переводят нейрон Σ_5 в активное состояние, и его единичный выходной сигнал поступает на входы сброса в нуль всех нейронов Y^1 -слоя. Таким образом, единичные выходные сигналы останутся только на выходах трех нейронов: Y_{k1}^2 , Y_{k2}^2 , Y_{k3}^3 . Если при продолжении итерационного процесса в слое A -элементов на выходах всех активных A -нейронов одновременно появятся нулевые выходные сигналы (при этом во время итерационного процесса не перейдут в активное состояние нейроны Σ_2 и Σ_1), то единичные сигналы на выходах нейронов Y_{k1}^2 , Y_{k2}^2 , Y_{k3}^3 будут указывать на то, что входное изображение находится на одинаковом расстоянии Хемминга от трех изображений, хранящихся в весах связей Z -элементов Z_{k1} , Z_{k2} , Z_{k3} .

Если при продолжении итерационного процесса в слое A -нейронов еще один выходной сигнал A -нейронов становится нулевым, например, без потери общности можно показать, что $U_{\text{вых}Ak3} = 0$, то в этом случае только два Y -нейрона (Y_{k1} и Y_{k2}) будут иметь единичные выходные сигналы. Эти сигналы переводят нейрон Σ_2 , имеющий функцию активации

$$U_{\text{вых}\Sigma_2} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma_2} = 2, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}\Sigma_2} \neq 2, \end{cases}$$

в активное состояние. Поскольку элементы Y^3 -слоя имеют такие же функции активации (5), что и нейроны слоев Y^1 и Y^2 , то единичные выходные сигналы нейронов Y_{k1} , Y_{k2} и Σ_2 переводят нейроны Y_{k1}^3 и Y_{k2}^3 в активное состояние. Сигналы $U_{\text{вых}Y_{k1}^3}$, $U_{\text{вых}Y_{k2}^3}$ по цепям обратных связей фиксируют единичные выходные сигналы нейронов Y_{k1}^3 и Y_{k2}^3 и поступают на входы нейрона U_{Σ_6} , имеющего функцию активации вида (6). Единичный выходной сигнал нейрона Σ_6 поступает на входы сброса в ноль всех нейронов Y^1 - и Y^2 -слоев и нейрона Σ_5 , переводя их в пассивное состояние. Нулевые сигналы будут и на выходах нейронов Σ_3 и Σ_4 , поскольку их функции активации описываются соотношением (4), а на выходах слоя Y -нейронов будет только два единичных сигнала. Если при продолжении итерационного процесса в слое A -элементов на выходах нейронов A_{k1} и A_{k2} одновременно появятся нулевые выходные сигналы, то единичные выходные сигналы Y_{k1}^3 и Y_{k2}^3 будут указывать, что входное изображение находится на одинаковом расстоянии Хемминга от двух эталонных изображений, хранящихся в весах связей нейронов Z_{k1} и Z_{k2} .

Аналогично, если при продолжении итерационного процесса в слое A -нейронов еще один выходной сигнал A -элемента становится нулевым, например, $U_{\text{вых}A_{k2}} = 0$, то в этом случае только один нейрон Y_{k1} будет иметь единичный выходной сигнал, который переведет нейрон Σ_1 в активное состояние. Единичный выходной сигнал нейрона Σ_1 поступает на входы сброса в ноль всех нейронов Y^1 -, Y^2 -, Y^3 -слоев и нейронов Σ_5 и Σ_6 , переводя их в пассивное состояние. В этом случае входное изображение находится на минимальном расстоянии Хемминга от эталонного изображения, хранящегося в весах связей нейрона Z_{k1} .

Таким образом, рассмотрен алгоритм получения от одного до четырех решений при распознавании изображений, находящихся на минимальном расстоянии от одного до четырех эталонных изображений, хранящихся в весах связей Z -нейронов. При этом описан наиболее трудоемкий алгоритм, когда вначале с помощью итерационного процесса в слое A -нейронов выделяются четыре

нейрона-кандидата в Y -слое, а затем последовательно анализируются возможности отнесения входного изображения к четырем, трем или двум различным классам изображений. Если входное изображение не находится на одинаковом расстоянии Хемминга от нескольких эталонных изображений, то выделяется единственное эталонное изображение, находящееся на минимальном расстоянии Хемминга от входного.

Аналогичным образом может быть проиллюстрировано функционирование нейронной сети и для других случаев, например, когда вначале выделяется не четыре, а три или два A -нейрона с положительными выходными сигналами, когда вначале выделяется четыре A -нейрона, а затем – два или один и т.д.

Выводы. Таким образом, разработана дискретная нейронная сеть, использующая расстояние Хемминга при распознавании черно-белых изображений и способная распознавать изображения, находящиеся на минимальном расстоянии Хемминга от одного до четырех эталонных изображений, хранящихся в весах связей нейронов Z -слоя. Сеть имеет однотипную наращиваемую с помощью дополнительных слоев нейронов архитектуру, которую можно обобщить и на распознавание изображений, находящихся на одинаковом расстоянии Хемминга от произвольного числа k ($k \geq 5$) эталонных изображений.

Список литературы: 1. Ямпольський Л.С. Нейротехнології та нейросистеми / Л.С. Ямпольський. – К.: Монографія. – "Дорадо-Друк, 2015. – 508 с. 2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 3. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 4. Fausett L. Fundamentals of Neural Network. Architectures, Algorithms and Applications / L. Fausett. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p. 5. Dmitrienko V.D. Neural Networks Art: Solving problems with multiple solutions and new teaching algorithm / V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotnyi, S.Yu. Leonov, I.P. Khavina // Open Neurology Journal. – 2014. – Vol. 8. – P. 15-21. 6. Дмитрієнко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2013. – 248 с. 7. Дмитрієнко В.Д. Вычислительная сеть для решения задач распознавания с несколькими решениями / В.Д. Дмитрієнко, И.П. Хавина // Вестник НТУ "ХПИ". – 2007. – № 19. – С. 58-63. 8. Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance / S. Grossberg // Cognitive Science. – 1987. – Vol. 11. – P. 23-63. 9. Дмитрієнко В.Д. Нейронная сеть, использующая расстояние Хемминга для распознавания изображений на границах нескольких классов / В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 39 (1012). – С. 57-67.

References:

1. Yampolsky, L.S. (2015). *Neurotechnology and Neurosystems*. Monograph, Dorado-Print, Kiev, 508 p.

2. Haykyn, S. (2006), *Neural networks: full course*. Publishing House "Williams", Moscow, 1104 p.
3. Barsky, A.B. (2004), *Neural networks: recognition, management, decision-making*. Finance and statistics, Moscow, 176 p.
4. Fausett, L. (1994), *Fundamentals of Neural Network. Architectures, Algorithms and Applications*, Prentice Hall International, Inc., New Jersey, 461 p.
5. Dmitrienko, V.D., Zakovorotnyi, A.Yu., Leonov, S.Yu., and Khavina, I.P. (2014), "Neural Networks Art: Solving problems with multiple solutions and new teaching algorithm", *Open Neurology Journal*, Vol. 8, pp. 15-21.
6. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotnyi, A.Yu., (2013), *Modeling and optimization of processes of control of movement of diesel trains*, Publishing house "NTMT", Kharkov, 248 p.
7. Dmitrienko, V.D., and Khavina, I.P., (2007), "A computer network for solving recognition problems with several solutions", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Vol. 19, pp. 58-63.
8. Grossberg, S., (1987), "Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance", *Cognitive Science*, Vol. 11, pp. 23-63.
9. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotnyi, A.Yu., (2013), "Neural network using the Hamming distance to recognize images at the boundaries of several classes", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Vol. 39, pp. 57-67.

Поступила (received) 03.11.2017

Статью представил д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель Украины, зав. кафедрой "Системы информации" НТУ "ХПИ" Серков А.А.

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

Zakovorotnyi Alexandr, , Dr. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (067) 546-35-27, e-mail: zakovorotnyi@kpi.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838x

Leonov Sergey, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"
Str. Kirpichova, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-8139-0458

УДК 519.71:004.89

Нейронна мережа Хеммінга для вирішення завдань з декількома рішеннями / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Леонов С.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 119 – 129.

У статті викладені результати аналізу особливостей функціонування дискретної нейронної мережі Хеммінга, яка не може розпізнавати вхідні чорно-білі зображення, що знаходяться на однаковій мінімальній відстані від двох або більшого числа еталонних зображень. Проаналізовано недоліки нейронних мереж, що використовують відстань Хеммінга і вирішують цю задачу для зображень, які перебувають на кордонах двох або трьох класів зображень. Запропоновано модифікація нейронної мережі Хеммінга, що розпізнає зображення на кордонах кількох класів. Іл.: 2. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: нейронна мережа Хеммінга; еталонні зображення; зображення на кордонах кількох класів.

УДК 004.89

Нейронная сеть Хемминга для решения задач с несколькими решениями / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Леонов С.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 119 – 129.

В статье изложены результаты анализа особенностей функционирования дискретной нейронной сети Хемминга, которая не может распознавать входные черно-белые изображения, находящиеся на одинаковом минимальном расстоянии от двух или большего числа эталонных изображений. Проанализированы недостатки нейронных сетей, использующих расстояние Хемминга и решающих эту задачу для изображений, находящихся на границах двух или трех классов изображений. Предложены модификация нейронной сети Хемминга, распознающей изображения на границах нескольких классов. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: нейронная сеть Хемминга; эталонные изображения; изображения на границах нескольких классов.

UDC 519.71:004.89

The Hamming neural network for solving problems with several solutions / Dmitrienko V.D., Zakovorotnyi A.Y., Leonov S.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 50 (1271). – P. 119 – 129.

The article presents the results of an analysis of the features of the functioning of the discrete neural network of Hamming, which can not recognize input black-and-white images that are at the same minimum distance from two or more reference images. The shortcomings of neural networks using the Hamming distance and solving this problem for images located on the boundaries of two or three classes of images are analyzed. A modification of the neural network of Hamming, recognizing images on the boundaries of several classes. Figs.: 2. Refs.: 9 titles.

Keywords: neural network of Hamming; reference images; images on the boundaries of several classes.

А.А. КАРГИН, д-р техн. наук, зав. каф., УкрГУЖТ, Харьков,
Т.Г. ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, доц., УкрГУЖТ, Харьков

АБСТРАГИРОВАНИЕ И КАТЕГОРИЗАЦИЯ В УМНЫХ МАШИНАХ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛЯРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рассматривается проблема создания умных машин, связанная с обобщением сенсорных данных для принятия управляющих решений в ситуациях, которые не были заложены при проектировании системы. Предлагается подход получения из сенсорных данных знаний в виде абстрактных категорий разного уровня обобщения. Представление сенсорных данных знаниями разного уровня абстрагирования формализовано в виде модели нечеткого гранулярного компьютеринга. Ил.: 1. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: умные машины; сенсорные данные; управляющие решения; знания; гранулярные вычисления.

Постановка проблемы и анализ литературы. С четвертой цифровой революцией (Industry 4.0) связывают массовое внедрение умных систем [1 – 3]: умных городов, умных заводов, умных машин (Smart Machines, SMs) и интернета вещей. Несмотря на значительные достижения в создании SM, остается проблема, на решение которой сегодня сконцентрировано внимание – несовершенство механизма обобщения для принятия управляющих решений в ситуациях, которые не были заложены при проектировании системы [4 – 7]. Получить управляющее решение непосредственно на основании первичных сенсорных данных затруднительно, так как для реального окружения описание ситуации не поддается параметризации и приходится обрабатывать большое количество прототипов ситуаций, построенных в виде конкретных наборов сенсорных данных. Для представления ситуации в системе управления SM возможно использовать знания разного уровня абстрагирования и обобщения, полученные из сенсорных данных. Порции таких знаний (категории или понятия) могут рассматриваться как информационные гранулы (Information Granular, IG), образующие гранулярную структуру (Granularly Structure, GS). Знания о всех возможных ситуациях представлены многоуровневой GS. Информационная гранула, как форма абстрактного описания фрагмента ситуации на абстрактном уровне, с одной стороны, может рассматриваться как порция знаний, дающая определение понятию, а, с другой стороны, – как вычислитель, который осуществляет обработку сенсорных данных по алгоритму, предопределённому этой порцией знаний. Разработка модели многоуровневого гранулярного представления сенсорных данных для описания ситуаций, в которых

SM принимают управляющие решения, является нерешенной на сегодняшний день проблемой.

Размерность задачи ситуационного управления существенно сокращается благодаря использованию нечётких правил [8, 9]. Однако, аппарат нечётких множеств первого и второго типа, а также лингвистических переменных позволяет выполнять не более, чем двухуровневое обобщение и абстрагирование, чего явно не достаточно для реальных задач, с которыми сталкиваются SM. Другое направление решения проблемы – абстрагирование и категоризация в виде концептов [10 – 11]. Это существенно сокращает количество возможных прототипов ситуаций (иерархических классов) и, соответственно, решающих правил. В [12] рассмотрена модель представления произвольного набора сенсорных данных концептами разного уровня абстракций и категорий, которые формализованы, как информационные гранулы (Information Granular, IG), образующие гранулярную структуру (Granularly Structure, GS). Обзор возможностей аппарата гранулярных вычислений приведен в [12]. Используемый в настоящей статье подход гранулярного представления знаний и гранулярных вычислений (Granularly Computing, GC) базируется на моделях [13, 14].

Цель статьи – разработка модели GC, которая для произвольного набора сенсорных данных на основе знаний, представленных GS, формирует обобщенное описание ситуации в виде категорий.

Постановка задачи. Задача ставится в следующем виде. Знания, связанные с информационной гранулой ig_i^l , где ig_i^l – обозначение категории, l – уровень GS, i – номер гранулы на уровне, раскрывают, через понятия более низкого уровня обобщения. Формально такая порция знаний (прототип) представлена [12]:

$$\langle N, G\{ig_i^l\} = \{ig_j^k\}, (\{\hat{\alpha}_{ig_j^k}, \hat{\beta}_{ig_j^k}, \hat{\gamma}_{ig_j^k}, v_{ig_j^k}\}, \forall g_j^k \in \Omega_{ig_i^l}) \rangle, \quad (1)$$

где N – идентификатор категории; $G: \forall (g_j^k, ig_i^l) \in \mathbf{E} \times \mathbf{E}$ – отношение, заданное на пересечении множеств \mathbf{E} IG всех уровней; $G\{ig_i^l = \Omega_{ig_i^l} = \{ig_j^k\}$ – фрагмент отношения G , представляющий подмножество гранул $\{ig_j^k\}$ с которыми имеются связи у гранулы ig_i^l .

Дуге, связывающей рассматриваемую гранулу ig_i^l с гранулой ig_j^k в (1), ставится в соответствие образец (прототип) в виде параметров $\hat{\alpha}_{ig_j^k}, \hat{\beta}_{ig_j^k}, \hat{\gamma}_{ig_j^k}$ нечёткой характеристики гранулы $\Theta_{ig_j^k}$ и коэффициента

старения информации $\hat{v}_{ig_j^k}$, где "шляпка" означает конкретное значение параметра.

Нечёткая характеристика гранулы (Fuzzy Granular Characteristic, FGC) – оценка степени соответствия ситуации (набора сенсорных данных) категории, знания о которой представляет гранула. По сути, FGC – нечёткое множество, заданное на универсальном множестве $\theta \in [-1, +1]$ (шкала возможных значений уверенности – чёткий фактор уверенности) [13]:

$$\tilde{\Theta} : \{\theta | \mu_{\tilde{\Theta}}(\theta), \forall \theta \in [-1, +1]\}, \quad (2)$$

где волнистая линия под символом обозначает нечёткое множество;

$$\mu_{\tilde{\Theta}}(\theta) = \gamma \cdot e^{-(\theta - \alpha)^2 / 2\beta^2}; \quad \alpha \in [-1, +1], \quad \gamma \in [0, +1], \quad \beta \in (0, \infty).$$

Параметр α есть численная оценка уверенности в том, что сенсорные данные соответствуют описанию ситуации в виде категории. Параметр γ указывает на полноту информации: насколько информативны сенсорные данные для представления категории. Динамические характеристики сенсорных данных оцениваются параметром динамичности β – интервалом времени с момента, когда появилась ситуация, описываемая категорией.

Гранулярные вычисления базируются на универсальной модели обработки информации отдельно взятой IG. Вычислительная модель IG выглядит традиционно: на основании значений n входных переменных, где $n = \text{Card}(\Omega_{ig_i^l})$ в (1), вычисляется значение выходной переменной.

Входные и выходная переменные – FGC. Вычислительная модель IG сводится к сопоставлению фактических значений на входах IG с прототипами (1) IG. Результат сопоставления – степень соответствия сенсорных данных категории, которая представлена IG – FGC на выходе гранулы. Вычислительная модель IG принимает вид

$$[\tilde{\Theta}_{ig_i^l}]_t = F(\{([\tilde{\Theta}_{ig_j^k}]_t, \hat{\Theta}_{ig_j^k}) \forall ig_j^k \in \Omega_{ig_i^l}\}). \quad (3)$$

В (3) FGC в квадратных скобках с индексом времени t обозначены конкретные значения характеристик на соответствующем шаге вычислений. В статье раскрывается вычислительная модель (3) и приводится универсальный алгоритм гранулярных вычислений на основе этой модели

Вычислительная модель IG. Вначале введём базовую двуместную операцию над FGC в виде (4)

$$\tilde{\Theta} = \Lambda^{\alpha\beta\gamma}(\tilde{\Theta}_1, \tilde{\Theta}_2), \quad (4)$$

которая применяется отдельно к параметрам α , β , γ FGC, как показано ниже:

$$\alpha_{\tilde{\Theta}} = \Lambda^{\alpha}(\alpha_{\tilde{\Theta}_1}, \alpha_{\tilde{\Theta}_2}) = \begin{cases} \alpha_{\tilde{\Theta}_1} + \alpha_{\tilde{\Theta}_2} - \alpha_{\tilde{\Theta}_1} \cdot \alpha_{\tilde{\Theta}_2}, & \text{if } \alpha_{\tilde{\Theta}_1} \geq 0 \ \& \ \alpha_{\tilde{\Theta}_2} \geq 0; \\ \alpha_{\tilde{\Theta}_1} + \alpha_{\tilde{\Theta}_2} + \alpha_{\tilde{\Theta}_1} \cdot \alpha_{\tilde{\Theta}_2}, & \text{if } \alpha_{\tilde{\Theta}_1} < 0 \ \& \ \alpha_{\tilde{\Theta}_2} < 0; \\ (\alpha_{\tilde{\Theta}_1} + \alpha_{\tilde{\Theta}_2}) / (1 + \text{MIN}(|\alpha_{\tilde{\Theta}_1}| + |\alpha_{\tilde{\Theta}_2}|)), & \text{otherwise}; \end{cases}$$

$$\beta_{\tilde{\Theta}} = \Lambda^{\beta}(\alpha_{\tilde{\Theta}}, \beta_{\tilde{\Theta}}^-) = \begin{cases} \tilde{\beta}, & \text{if } (\alpha_{\tilde{\Theta}} \geq \varepsilon \ \& \ q(t) = 0) \ \text{or} \ (\alpha_{\tilde{\Theta}} \leq -\varepsilon \ \& \ q(t) = 1); \\ \beta_{\tilde{\Theta}}^- + 1, & \text{otherwise}; \end{cases}$$

$$\gamma_{\tilde{\Theta}} = \Lambda^{\gamma}(\gamma_{\tilde{\Theta}_1}, \gamma_{\tilde{\Theta}_2}) = \gamma_{\tilde{\Theta}_1} + \gamma_{\tilde{\Theta}_2} - \gamma_{\tilde{\Theta}_1} \cdot \gamma_{\tilde{\Theta}_2};$$

β^- – значение параметра на предыдущем шаге вычислений.

На основе этой операции построена вычислительная модель IG. Динамические свойства модели поддерживает операция (5)

$$[\tilde{\Theta}_{ig_i^l}]_t = \Lambda^{\alpha\beta\gamma}([\tilde{\Theta}_{ig_i^l}]_{t-1} \cdot e^{-\nu_{ig_i^l} [\beta_{ig_i^l}]_{t-1}}, [\tilde{\Theta}'_t]). \quad (5)$$

В (5) входит FGC $[\tilde{\Theta}'_t]$, которая представлена выражением (6)

$$[\tilde{\Theta}'_t] = \text{norm}([\tilde{\Theta}''_t]), \quad (6)$$

где $\alpha_{[\tilde{\Theta}'_t]} = 2(\alpha_{[\tilde{\Theta}''_t]} - 0.5)$, $\beta_{[\tilde{\Theta}'_t]} = \beta_{[\tilde{\Theta}''_t]}$, $\gamma_{[\tilde{\Theta}'_t]} = \gamma_{[\tilde{\Theta}''_t]}$;

$$[\tilde{\Theta}''_t] = \oplus^{\alpha\gamma}((\gamma_{\tilde{\Theta}_n} \cdot \tilde{\Theta}_n), \dots, (\gamma_{\tilde{\Theta}_r} \cdot \tilde{\Theta}_r), \dots, (\gamma_{\tilde{\Theta}_1} \cdot \tilde{\Theta}_1)), \tilde{\Theta}_r = [\tilde{\Theta}_{ig_r^k}]_t;$$

$$\alpha_{[\tilde{\Theta}''_t]} = \begin{cases} \Delta\alpha, & \text{if } \Delta\alpha \leq 1; \\ 1, & \text{if } \Delta\alpha > 1; \end{cases} \quad \gamma_{[\tilde{\Theta}''_t]} = \begin{cases} \Delta\gamma, & \text{if } \Delta\gamma \leq 1; \\ 1, & \text{if } \Delta\gamma > 1; \end{cases}$$

$$\Delta\alpha = (\hat{\gamma}_{\hat{\Theta}_n} \cdot \Delta\alpha_{\tilde{\Theta}_n}) + \dots + (\hat{\gamma}_{\hat{\Theta}_r} \cdot \Delta\alpha_{\tilde{\Theta}_r}) + \dots + (\hat{\gamma}_{\hat{\Theta}_1} \cdot \Delta\alpha_{\tilde{\Theta}_1});$$

$$\Delta\alpha_{\tilde{\theta}_r} = I_{\tilde{\theta}_r} \cdot \text{MIN}(\Delta_{\tilde{\theta}_r}^1, \Delta_{\tilde{\theta}_r}^2); \quad \Delta_{\tilde{\theta}_r}^1 = 1 - \frac{1}{2} \sqrt{(\alpha_{\tilde{\theta}_r} - \hat{\alpha}_{\tilde{\theta}_r})^2};$$

$$\Delta_{\tilde{\theta}_r}^2 = e^{-\frac{1}{v} |\beta_{\tilde{\theta}_r} - \hat{\beta}_{\tilde{\theta}_r}|};$$

$$\Delta\gamma = \gamma'_{\tilde{\theta}_n} + \dots + \gamma'_{\tilde{\theta}_r} + \dots + \gamma'_{\tilde{\theta}_1}; \quad \gamma'_{\tilde{\theta}_r} = \text{MIN}(\gamma_{\tilde{\theta}_r}, \hat{\gamma}_{\tilde{\theta}_r});$$

$I_{\tilde{\theta}_r}$ – коэффициент информативности гранулы [13].

В [12] показано, что для представления знаний в задачах управления SM достаточно следующего набора n -арных отношений в (1): "is a", "consist of", "before" и "part of". Первые два отношения используются в семантических моделях представления знаний; "before" лежит в основе временной логики; "part of" – основной механизм обобщений. Введенная выше модель (5) является универсальной, поскольку тип отношения находит отражение в форме прототипа (1), а вычислительная модель IG остаётся без изменений. Покажем это. Отношения "is_a" и "consist_of" описывают статику, поэтому в них сенсорные данные рассматриваются только для текущего момента времени. Игнорирование динамических свойств реализуется путём задания следующих значений коэффициента старения $\hat{v}_{ig_i^l} \rightarrow \infty$ и параметра $\hat{\beta}_{ig_i^l} = [\hat{\beta}_{ig_i^l}]_t$ в прототипе (1). Отношение "is_a" с точки зрения полноты информации трактуется, как "хотя бы одного примера достаточно для полного представления о категории". Поэтому в (1) $\hat{\gamma}_{ig_i^g} = 1$ для всех нижележащих гранул, с которыми имеются связи

$$\langle N, G^{isa} \{ig_i^l\} = \{ig_j^k\}, (\{(\hat{\alpha}_{ig_j^k}, [\beta_{ig_j^k}]_t, 1, \infty), \forall g_j^k \in \Omega_{ig_i^l}\}) \rangle.$$

Путём аналогичных рассуждений приходим к прототипам для отношений "consist of", "before" и "part of":

$$\langle N, G^{cof} \{ig_i^l\} = \{ig_j^k\}, (\{(\hat{\alpha}_{ig_j^k}, [\beta_{ig_j^k}]_t, \frac{1}{n} + \varepsilon, \infty), \forall g_j^k \in \Omega_{ig_i^l}\}) \rangle;$$

$$\langle N, G^{bef} \{ig_i^l\} = \{ig_j^k\}, (\{(\hat{\alpha}_{ig_j^k}, \hat{\gamma}_{ig_j^k}, \beta_{ig_j^k} = \Delta\tau, v_{ig_j^k} = 1), \forall g_j^k \in \Omega_{ig_i^l}\}) \rangle;$$

$$\langle N, G^{pof} \{ig_i^l\} = \{ig_j^k\}, (\{(\hat{\alpha}_{ig_j^k}, \hat{\gamma}_{ig_j^k}, [\beta_{ig_j^k}]_t, \hat{v}), \forall g_j^k \in \Omega_{ig_i^l}\}) \rangle.$$

Пример гранулярных вычислений в GS, представляющей знания о ситуации на перекрёстке. В [12] в качестве примера рассматривается SM на перекрёстке, который она должна проехать. Рассматривается упрощенный вариант, когда информация о ситуации на перекрёстке поступает только от ультразвукового датчика (УЗ) расстояния до объекта. SM сканирует пространство вокруг себя и на основании сенсорных данных строит описание ситуации. Знания о ситуациях структурированы на следующие категории: "опасно для поворота направо", "безопасно для поворота направо", "опасно для поворота налево" и другие. Полное описание ситуаций в виде категорий приведено в [12]. На рис. 1, а представлен фрагмент знаний "на близком расстоянии безопасно" в виде концептуальной сети, используемой в определении категории "безопасно для поворота направо".

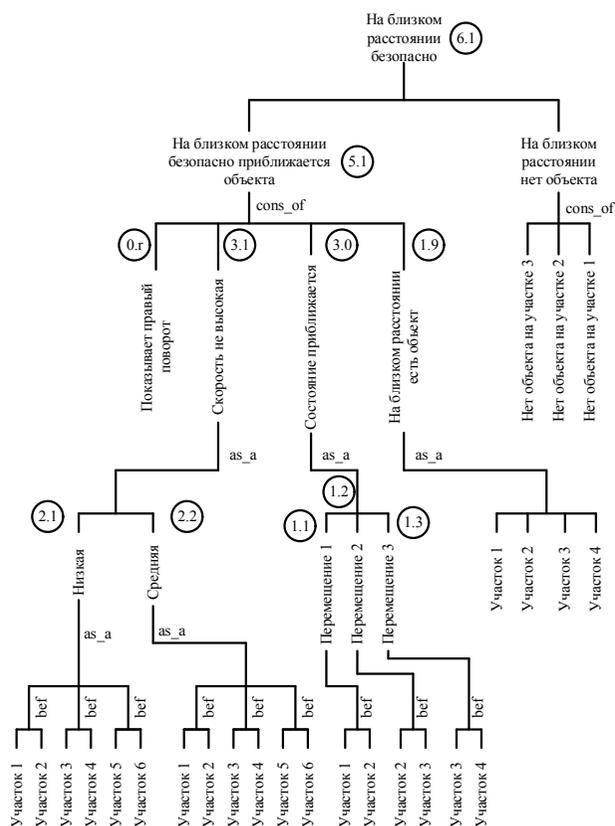


Рис. 1, а. Представления знаний о категории "безопасно для поворота направо" в виде семантической сети

На рис. 1, б данный фрагмент знаний изображен в виде GS. На нулевом уровне – гранулированное представление сенсорных данных расстояния до объекта (интервалы от 1 до 9), полученные от ультразвукового сенсора и освещённость поворотных фонарей движущихся объектов (*left* – (*lt*), *right* – (*rt*)).

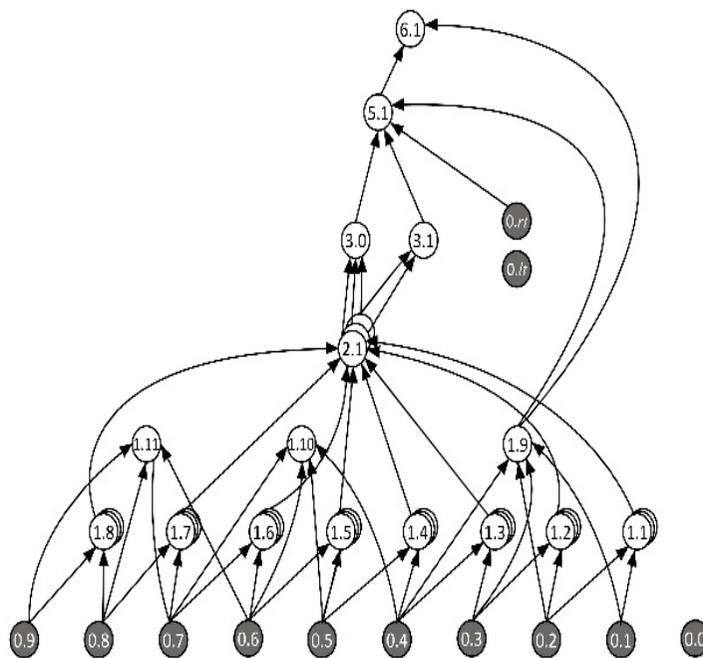


Рис. 1, б. Представления знаний о категории "безопасно для поворота направо" в виде GS

Смысловое содержание гранул можно получить из сопоставления рисунков 1, а и 1, б. Например, порцию знаний, которую представляет IG с номером 1.9 на рис. 1, а, можно понять из рис. 1, б, где рядом с описанием знаний "на близком расстоянии нет объектов" указан в кружочке номер гранулы 1.9. Ниже на рис. 2 приведены результаты гранулярных вычислений. Столбцам соответствуют моменты времени, когда изменялись значения сенсорных данных (FGC нулевого уровня). Эти изменения вызваны приближением объекта справа к SM, находящейся на перекрёстке. В ячейках таблицы указаны слева на право три параметра α , β γ FGC. Номера IG на рис. 2 соответствуют номерам гранул на рис. 1, б. Начальные значения параметров FGC указаны в столбце для нулевого момента времени.

Таблиця

Результати гранулярних вычислений параметров α, β, γ FGC

IG	t									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.1	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$								
0.2	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$							
0.3	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$						
0.4	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$				
0.5	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$
0.6	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$	$^{-1}_5 1$
0.7	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$	$^{-1}_5 1$	$^{-1}_6 1$
0.8	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$	$^{-1}_5 1$	$^{-1}_6 1$	$^{-1}_7 1$
0.9	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$	$^{-1}_5 1$	$^{-1}_6 1$	$^{-1}_7 1$
0.r	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^1_1 1$							
1.1	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_0 1$	$^1_0 1$						
1.2	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_0 1$	$^1_0 1$	$^0_1 1$					
1.3	$^{-1}_{\infty 1}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_0 1$	$^1_0 1$	$^0_1 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$
1.4	? ? ?	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_0 1$	$^1_0 1$	$^0_1 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$
1.5	? ? ?	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_0 1$	$^1_0 1$	$^0_1 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$
1.6	? ? ?	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_{\infty 0.6}$	$^1_0 1$	$^0_1 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$
1.7	? ? ?	$^{-1}_{\infty 0}$	$^0_{\infty 0.6}$	$^1_0 1$	$^0_1 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$
1.8	? ? ?	$^0_{\infty 0.6}$	$^0_1 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$	$^{-1}_5 1$	$^{-1}_6 1$
1.9	? ? ?	$^{-1}_{\infty 1}$	$^1_0 1$	$^1_1 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$				
1.10	? ? ?	$^{-1}_{\infty 0}$	$^{-1}_{\infty 0}$	$^1_0 1$	$^1_1 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$
1.11	? ? ?	$^1_0 1$	$^1_0 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$
2.1	? ? ?	$^0_{\infty 0.6}$	$^1_0 1$	$^1_1 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$	$^1_4 1$	$^1_5 1$	$^1_6 1$	$^1_7 1$
3.0	? ? ?	$^0_{\infty 0.6}$	$^1_0 1$	$^1_1 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$	$^1_4 1$	$^1_5 1$	$^1_6 1$	$^1_7 1$
3.1	? ? ?	$^0_{\infty 0.6}$	$^1_0 1$	$^1_1 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$	$^1_4 1$	$^1_5 1$	$^1_6 1$	$^1_7 1$
5.1	? ? ?	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^{-1}_2 1$	$^{-1}_3 1$	$^{-1}_4 1$	$^{-1}_5 1$	$^{-1}_6 1$	$^1_0 1$	$^1_1 1$
6.1	? ? ?	$^1_0 1$	$^1_1 1$	$^1_2 1$	$^1_3 1$	$^1_4 1$	$^{-1}_0 1$	$^{-1}_1 1$	$^1_0 1$	$^1_1 1$

Из таблицы видно, что на этот момент времени для всех IG нулевого уровня параметры $\alpha = -1$ (нет объекта в районе перекрёстка), $\beta = \infty$ (давно не было) и $\gamma = 1$ (FGC формируется на основе полной информации). Нечёткие характеристики гранул более высокого уровня не определены.

В момент времени 1, приближающийся объект на дальнем расстоянии (зафиксирован УЗ датчиком), что нашло отражение в изменении FGC нулевого уровня с номером 0.9 ($\alpha = +1$, $\beta = 0$, $\gamma = 1$).

В следующий момент времени $t = 2$ показано, что приближающийся к перекрёстку объект переместился и находится на расстоянии, покрываемом IG с номером 0.8. Поэтому параметры FGC с номером 0.9 изменились $\alpha = -1$, $\beta = 0$, $\gamma = 1$, а гранулы 0.8 приняли значения $\alpha = +1$, $\beta = 0$, $\gamma = 1$. Кроме этого гранула 1.8 описывает ситуацию категорией "приближается к перекрёстку объект", а гранула 1.11 – "далеко". В целом характеризует ситуацию гранула 6.1 самого верхнего уровня обобщения: "на близком расстоянии безопасно", поскольку "на близком расстоянии нет объекта". Об этом можно судить по значениям параметров $\alpha = +1$, $\gamma = 1$ FGC с номерами 6.1 и 1.9. Аналогичным образом можно проанализировать ситуацию на перекрёстке по мере приближения объекта. Так, для момента времени 7, когда приближающийся объект находился близко и до этого не включал правый поворот, ситуация не характеризуется как "на близком расстоянии безопасно", в момент времени 8, когда был включен правый поворот ситуация подпадает под категорию "на близком расстоянии безопасно".

Выводы. Принятие управляющих решений на основе обработки сенсорной информации с помощью механизма обобщения и категоризации, формализованного в виде гранулярного компьютеринга в многоуровневой гранулярной структуре, имеет преимущества по сравнению с классическими моделями нечёткого вывода. Этот механизм позволяет реализовать свойственную для человека процедуру принятия решения на основании обобщения и категоризации сенсорных данных. Кроме повышения адекватности моделей представления знаний, используемых в рассуждениях экспертов, предложенная модель уменьшает размерность решаемой задачи: уменьшается количество правил сопоставления образцов ситуаций с управляющими решениями.

Список литературы: Промышленная революция 4.0. На пороге новой эпохи. URL: <http://chp.com.ua/all-news/item/46476-promyshlennaya-revoljutsiya-4-0-na-poroge-novoj-epokhi> (опубликовано 19.01.2017). 2. An Executive's Guide to Industry 4.0, Smart Factories and Beyond. URL: <http://www.ioti.com/industrial-iiot/industry-4-0-smart-factories-and-beyond> (опубликовано 24.05.2017). 3. Ashton K. Making

sense of IoT. How the Internet of Things became humanity's nervous system URL: http://www.arubanetworks.com/assets/eo/HPE_Aruba_IoT_eBook.pdf. (Last accessed: 14.08.2017). **4.** Davenport T., Kirby J. Just How smart are smart machines URL: http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2016/57306.pdf. (Last accessed: 14.08.2017). **5.** Elmenreich W. Intelligent Methods for Embedded Systems URL: https://www.researchgate.net/publication/2915435_Intelligent_Methods_for_Embedded_Systems. (Last accessed: 14.08.2017). **6.** Alippi C. Intelligence for Embedded Systems: a Methodological approach, Springer, 2014. – 283 p. **7.** Каргін А. О. Модель сенсорної пам'яті інтелектуальної машини з механізмами узагальнення та абстрагування / А.О. Каргін, С.О. Тімчук, К.О. Ісаєнков, Г.Б. Галіч // Системи озброєння та військова техніка. ХУПС ім. І.Кожедуба МОУ, Харків, 2015. – № 3 (43). – С. 85-88. **8.** Pigat A. Fuzzy modelling and control. Physica-Verlag Heidelberg, – 2001. – 798 p. **9.** Petrenko T. Adaptive Behavior Control Model of Non Player Character / T. Petrenko, O. Tymchuk // Proceedings of the 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim-AMSS), Cambridge, United Kingdom. – 10-12 Apr. 2013. – P. 39-44. **10.** Clancey W.J. Heuristic classification / W.J. Clancey // Artificial Intelligence. – 1985. – № 27. – P. 289-350. **11.** Chandrasekaran B. Generic tasks in knowledge-based reasoning: high-level building blocks for expert systems design / B. Chandrasekaran // IEEE Expert. – 1986. – № 1 (3). – P. 23-30. **12.** Каргін А. О. Управление умной машиной на основе модели категорийного представления ситуации: подход гранулярного компьютеринга / А.А. Каргін, Т.Г. Петренко // Проблемы информационных технологий, 2017. – № 1 (021). – С. 17-28. **13.** Каргін А.А. Введение в интеллектуальные машины. Книга 1. Интеллектуальные регуляторы / А.А. Каргін. – Донецк: Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. – 526 с. **14.** Zadeh L.A. Fuzzy sets and information granularity / L. Zadeh // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications – Amsterdam: North-Holland, 1979 – P. 3-18.

References:

1. "Industrial Revolution 4.0. On the threshold of a new era", URL: <http://chp.com.ua/all-news/item/46476-promyshlennaya-revolyuetsiya-4-0-na-poroge-novoj-epokhi> (accessed 19.01.2017).
2. "An Executive's Guide to Industry 4.0, Smart Factories and Beyond", URL: <http://www.ioti.com/industrial-iiot/iiot/executive-s-guide-industry-40-smart-factories-and-beyond> (accessed 24.05.2017).
3. Ashton, K. (2017), "Making sense of IoT. How the Internet of Things became humanity's nervous system", http://www.arubanetworks.com/assets/eo/HPE_Aruba_IoT_eBook.pdf. (accessed 14 September 2017).
4. Davenport, T. and Kirby, J. (2016), "Just How smart are smart machines", http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2016/57306.pdf. (accessed 14 September 2017).
5. Elmenreich, W. (2016), "Intelligent Methods for Embedded Systems", https://www.researchgate.net/publication/2915435_Intelligent_Methods_for_Embedded_Systems. (accessed 14 September 2017).
6. Alippi, C. (2014), *Intelligence for Embedded Systems: a Methodological approach*, Springer, 283 p.
7. Kargin, A. A., Timchuk, S.O., Isaenkov, K.O., Galich, G.B., (2015), "The model of sensory memory of the smart machine with the mechanisms of generalization and abstraction" *Sistemi ozbroennja ta viyskova tehnika. HUPS im. I. Kozheduba MOU, Kharkiv*, Vol. 3 (43), pp.85-88.
8. Pigat, A. (2001), *Fuzzy modelling and control*, Physica-Verlag Heidelberg, 798 p.
9. Petrenko, T. and Tymchuk, O. (2013), "Adaptive Behavior Control Model of Non Player

Character", *Proceedings of the 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim-AMSS), Cambridge, United Kingdom, 10-12 Apr., 2013*, pp. 39-44.

10. Clancey, W.J. (1985), "Heuristic classification", *Artificial Intelligence*, Vol. 27, pp. 289-350.

11. Chandrasekaran, B. (1986), "Generic tasks in knowledge-based reasoning: high-level building blocks for expert systems design", *IEEE Expert*, Vol. 1(3), pp. 23-30.

12. Kargin, A.A. and Petrenko, T.G. (2017) "Smart machine control based on the model of the category representation of the situation: the approach of granular computing", *Problems of Information Technology*, Vol. 1 (021), pp.17-28.

13. Kargin, A.A. (2010), *Introduction to intelligent machines. Book 1. Intelligent Controllers*, Nord-Press, DonNU, Donetsk, 526 p.

14. Zadeh, L.A. (1979), "Fuzzy sets and information granularity", *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, Amsterdam, North-Holland, pp. 3–18.

Статью представил д-р техн. наук, проф. ХНУРЭ Кривуля Г.Ф.

Поступила (received) 10.09.2017

Kargin Alnatojii, Dr. Sci.Tech, Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
Feerbaha,7, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 057 730-19-84, e-mail: kargin@kart.edu.ua
ORCID ID: 0000-0002-7626-933

Petrenko Tetyana Cand. Sci.Tech., Associate professor
Ukrainian State University of Railway Transport
Feerbaha,7, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 057 730-19-84, e-mail: petrenko_tg@kart.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-6305-7918

УДК 004.81: 004.383.8

Абстрагування та категоризація в розумних машинах на основі гранулярних обчислень / А.О. Каргін, Т.Г. Петренко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 130 – 141.

Розглядається проблема створення розумних машин, пов'язана з узагальненням сенсорних даних для прийняття управлінських рішень в ситуаціях, які не були закладені при проектуванні системи. Пропонується підхід отримання знань із сенсорних даних у вигляді абстрактних категорій різного рівня узагальнення. Механізм подання сенсорних даних знаннями різного рівня абстрагування і узагальнення формалізований у вигляді моделі нечіткого гранулярного комп'ютерингу. Ил.: 1. Табл.: 1. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: розумні машини; сенсорні дані; управлінські рішення; знання; гранулярні обчислення.

УДК 004.81: 004.383.8

Абстрагирование и категоризация в умных машинах на основе гранулярных вычислений / А.А. Каргин, Т.Г. Петренко // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 130 – 141.

Рассматривается проблема создания умных машин, связанная с обобщением сенсорных данных для принятия управляющих решений в ситуациях, которые не были заложены при проектировании системы. Предлагается подход получения из сенсорных данных знаний в виде абстрактных категорий разного уровня обобщения. Представление сенсорных данных знаниями разного уровня абстрагирования формализовано в виде модели нечеткого гранулярного компьютеринга. Ил.: 1. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: умные машины; сенсорные данные; управляющие решения; знания; гранулярные вычисления.

UDC 004.81: 004.383.8

Abstraction and categorization in smart machines based on granular computations / A.A. Kargin, T.G. Petrenko // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 130 – 141.

The problem of creating intelligent machines is considered, which is connected with the generalization of sensory data for making control decisions in situations that were not inherent in the design of the system. The approach of obtaining knowledge from sensory data in the form of abstract categories of different levels of generalization is proposed. The representation of sensory data by knowledge of different levels of abstraction is formalized in the form of a model of fuzzy granular computing. Figs.: 1. Tabl.: 1. Refs.: 14 titles.

Keywords: smart machines; sensory data; control decisions; knowledge; granular computations.

*Интеллектуальные технологии и
системы*

УДК 65.011.56

DOI: 10.20998/2411-0558.2017.50.11

Л.А. ТИМАШОВА, д-р техн. наук, зав. отд. Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев,

В.А. ЛЕЩЕНКО, н.с., Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев,

А.И. МОРОЗОВА, гл. инж.-прогр., Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев,

Л.Ю. ТАРАН, гл. инж.-прогр., Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

Представлены результаты интеллектуализации системы управления производством с помощью работающих со знаниями технологий. Приведено онтологическое описание системы управления и задач, связанных с представлением изделия, контроля обеспеченности производственной программы технической документацией и контроля структуры документов. Ил.: 2. Табл.: 6. Библиогр.: 20 назв.

Ключевые слова: производство; системы управления; изделие; производственная программа; структура документов, знания.

Постановка проблемы. Интеллектуализация систем управления производством является назревшей *необходимостью современных предприятий*, у которых, кроме возможности автоматизации их систем управления и организации производств в рамках виртуальных предприятий для объединения распределенных ресурсов участников [1], появилась возможность использовать опыт и знания менеджеров и персонала. Трудности этого этапа, по большей части, связаны со сложностью переключения человеческого сознания с технологий работы с данными на технологии работы со знаниями [2].

Анализ литературы. На данный момент имеются как теоретические, так и практические разработки по созданию работающих со знаниями интеллектуальных технологий и систем для решения практических задач. Уже в работе [3] автор рассматривает возможность применения для принятия решений методов рассуждений, опирающихся на знания и особенности человеческого языка. Дальнейшие работы в этом направлении были продолжены при разработке экспертных систем для решения практических задач в некоторых узкоспециализированных

© Л.А. Тимашова, В.А. Лещенко, А.И. Морозова, Л.Ю. Таран, 2017

областях, где большую роль играют знания опытных специалистов [4]. Затем появились работы, связанные с использованием знаний при управлении бизнесом [5], интеллектуальным моделированием [6 – 8], разработкой интеллектуальных систем управления предприятием [9 – 12]. Анализ имеющейся литературы показал, что модели работы со знаниями существенным образом зависят от предметных областей и требуют разработки интеллектуальных технологий, учитывающих их специфику. Эта специфика проявляется и при создании интеллектуальных систем управления производством, тоже требующих разработки специальных моделей. При этом из существующего арсенала методов инженерии знаний [2] необходимо отобрать методы, с помощью которых специфика решения задач управления производством была бы отражена наиболее полно.

В свою очередь, производство машиностроительного предприятия является достаточно сложным объектом для интеллектуализации. Это обусловлено наличием в структуре объекта большого количества элементов, своим состоянием и поведением влияющих друг на друга; наличием задач, решаемых в условиях нечеткости и неопределенности; потребностью в принятии решений с учетом различных критериев; обилием внешних факторов, влияющих на принимаемые решения и поведение объекта [13 – 15].

Цель статьи. Разработка моделей для интеллектуализации системы управления производством на базе знаний и опыта персонала предприятия.

Интеллектуализация систем управления. Интеллектуализация объектов требует представления знаний о них с помощью формальных моделей и разработки информационных технологий для решения задач предметной области. Представленные ниже модели были разработаны на основе теоретических исследований [2 – 11] и практических разработок авторов, связанных с созданием автоматизированных систем управления [12 – 15]. Модели обеспечивают целостное представление знаний о системе управления производством с помощью онтологии. Для извлечения, структуризации и представления с помощью формальных моделей разработаны отдельные модели. Это позволяет знания, которыми владеет управленческий персонал, обрабатывать с помощью компьютерных технологий [16 – 18]. Работа моделей демонстрируется на примере системы управления кузнечно-прессовым цехом одного из машиностроительных предприятий [13 – 15].

При интеллектуализации системы управления в целом в основу первого уровня структуризации была взята схема управления производством (рис. 1), объединяющая в одном контуре управления

такие элементы, как изделие, производство изделия, управление производством изделия, цех [13]. Такое понимание базовых понятий первого уровня структуризации было положено в последующие уровни структуризации этих понятий и всей предметной области (табл. 1).

Для описания *изделия* используются такие понятия, как *структура* изделия и *технология* его изготовления. Структура определяет узлы, входящие в изделие, а структура узла – входящие в узел детали. Технология изготовления определяет длительность и последовательность выполнения операций для изготовления детали.

Производство изделия, как одна из стадий жизненного цикла изделия, рассматривает процессы, относящиеся непосредственно к изготовлению деталей. Эти процессы можно объединить в один общий бизнес-процесс, для описания которого используются такие понятия, как "вход, управляющие установки, процесс, выход" [1]. При этом: вход – это сырье и материалы, слитки; управляющие установки – владелец процесса, нормативы, методики, инструкции, правила выполнения бизнес-процессов; процесс – технологические операции, ресурсы; ресурсы – оборудование, оснастка, профессия, инструментарий; выход – поковки, представляющие собой заготовки для дальнейшей обработки деталей механическими цехами.

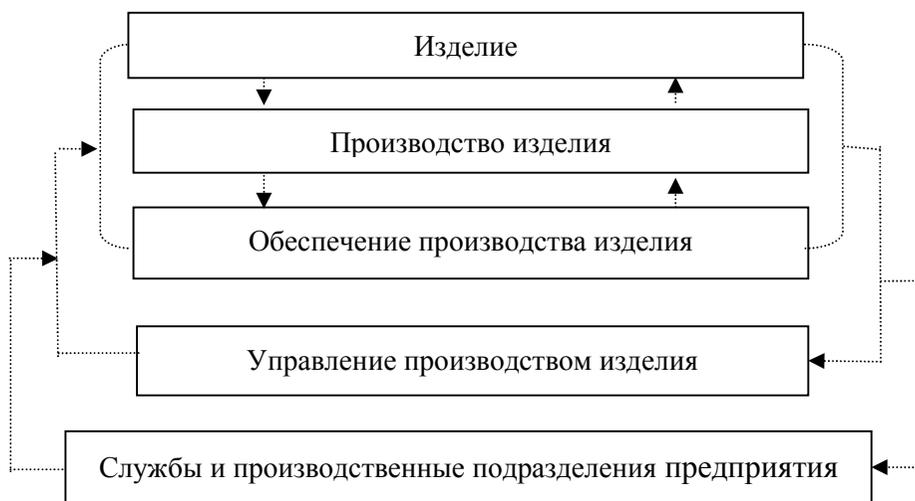


Рис. 1. Общая схема управления производством

Обеспечение производства изделия включает ресурсное обеспечение и подготовку производства. Кроме того, в подготовку производства включены работы, связанные с модернизацией оборудования, перепланировкой зданий, обучением персонала и повышением его квалификации и многое другое.

Таблица 1

Понятийное описание системы управления производством

№ п.п.	Понятие	Уровни структуризации	
		2-й	3-й
1	2	3	4
1	Изделие	Структура, Технология	<i>Структура:</i> изделие, узел, деталь. <i>Технология:</i> техпроцесс, операции, ресурсы (материальные, производственные, трудовые)
2	Производство изделия	Вход, установки, процесс, ресурсы, выход	<i>Вход:</i> сырье, материалы. <i>Установки:</i> владелец процесса, управляющие установки, стандарты и нормативы, методики, инструкции, правила выполнения бизнес-процессов. <i>Процесс:</i> процесс, операции. <i>Ресурсы:</i> оборудование, оснастка, инструменты, профессии, инфраструктура, программное обеспечение, информация, сервисы, инструментарий. <i>Выход:</i> продукт, результат переработки входа с помощью ресурсов на основании методики.
3	Обеспечение производства	Ресурсное, подготовка произ-ва	Обеспечение материалами, финансами; ремонт оборудования; обеспечение оснасткой, электроэнергией; оснащение рабочих мест.
4	Управление производством изделия	Процессы	<i>Планирование:</i> стратегическое, оперативное, бизнес-планирование. <i>Диспетчирование:</i> выдача заданий. <i>Учет:</i> материалов, заготовок, готовой продукции, выполнения заказов, выполненных работ, заработной платы, затрат, бюджетирование. <i>Контроль:</i> контроллинг. <i>Регулирование:</i> ситуационное управление. <i>Анализ:</i> анализ выполнения заданий, выполнения заказов, затрат, производственной программы, работы цеха.
5	Цех	Структура, деятельность, продукция	<i>Структура:</i> производственная, технологическая, организационная. <i>Деятельность:</i> логистическая, производственная, технологическая, экономическая, организационная. <i>Продукция:</i> поковки.

Управление состоит в планировании, учете, контроле, анализе и регулировании производства изделия. Планирование включает стратегическое, оперативное и бизнес-планирование. Диспетчирование обеспечивает окончательную корректировку плановых заданий и выдачу заданий непосредственным исполнителям. Учет предполагает фактический учет хода производства. Контроль состоит в отслеживании выполнения производственных заданий и выявлении всевозможных отклонений от их выполнения. Регулирование предполагает корректировку плановых заданий с учетом текущей ситуации на момент выполнения заданий. В ходе анализа анализируется выполнение и корректировка планов. Многие задачи по управлению производством, использующие математические методы, реализованы с помощью технологий, работающих с данными. Использование для решения этого класса задач технологии работы со знаниями дополняет методы их решения и существенно повышает их качество.

При рассмотрении понятия "*Цех*" описывается его структура, деятельность и результат. Для структуры цеха рассматриваются производственная, технологическая, организационная структуры.

Деятельность структурируется на логистическую, производственную, финансовую, организационную и управленческую. Логистическая деятельность связана с работами по перемещению материалов с других цехов, их хранением в цехе (цеховые кладовые) и своевременной доставкой на рабочие места. Сюда же включаются работы, связанные с подготовкой готовой продукции (поковок) для передачи на дальнейшую их обработку в другие цехи. *Управленческая и организационная* деятельность реализуется администрацией и службами цеха. *Продукцией* кузнечно-прессового цеха являются поковки для деталей.

Таким же образом определяются и последующие уровни структуризации. Так, например, "структура" может быть представлена следующим образом: *производственная*: участки (молотовый, прессовый, порошковый, готовой продукции, рабочие места), *технологическая*: оборудование (молот, пресс, печь), операции (ковка, прессование, термическая обработка), профессии (молотобойцы, кузнецы, кочегары, рабочие), *организационная*: администрация цеха (начальник цеха, зам. по производству, зам. по подготовке производства, сменный мастер, мастер участка), службы (планово-диспетчерское бюро, бюро технико-экономического планирования, бухгалтерия), рабочие (кузнецы, молотобойцы, загрузчики термических печей). Для описания понятий нижних уровней структуризации используются такие понятия, как свойства, описывающие понятия в целом, характеристики этих свойств и их значение [16]. Такая форма

описания понятий существенно облегчает процесс дальнейшей формализации знаний с помощью формальных моделей.

Интеллектуализация отдельных задач. Возможными *классами задач* по управлению производством для *интеллектуализации* являются задачи контроля ввода документа; традиционные и новые задачи с выбором методов их решения; задачи принятия решений, связанные с построением и выбором вариантов с учетом различных критериев [5, 19], планирования, связанные с постановкой целей и выбором способов их достижения с учетом имеющихся и прогнозируемых возможностей.

Понятийное описание изделия. Понятийное описание изделия включает описание свойств понятий, их характеристик и значений [20]. Для описания объектов используются такие термины, как "*деталь, операция, материал, оборудование, профессия, оснастка, заготовка*", а для описания свойств – "*имеет, состоит, требует, выполняет*". Для описания характеристик понятий используется их классификация на общие, количественные и качественные и их конкретные значения. Количественные характеристики описываются как "*вес, размер, количество, норма расхода, норма времени, производительность, применяемость, длительность изготовления, трудоемкость, затраты, цена, стоимость*", а качественные – как "*цвет, влагоустойчивость, температурный режим, удобство в эксплуатации*". Примеры описания детали, технологии и оборудования приведены в виде таблицы (табл. 2).

На основании этой информации разрабатываются онтологические схемы, на которых понятия и их отношения отражены в графическом виде, и выбираются формальные модели представления знаний. На базе знаний об изделии, его структуре и технологии изготовления формируется общий список с указанием количества узлов и деталей изделия, определяются операции, оборудование, материалы, нормы времени, нормы расхода материалов и нормативные затраты, время опережения и цикл изготовления единицы изделия, узла и детали. Формулируется конкретный запрос к системе, например, в виде "Определить потребное количество материала на изготовление одной или всех деталей изделия". При этом используются знания БЗ, характеризующих предметную область и происходящие в ней процессы. Знания структурируются до уровня фактов, однозначно определяемых алгоритмом решения конкретной задачи. Задаются правила интерпретации знаний в пространстве значений признаков конкретных объектов базы данных. Ответ на запрос формируется следующим образом. Формируется алгоритм решения задачи с использованием знаний путем последовательного раскрытия запроса или отдельных его

составляющих через элементарные знания БЗ. Затем алгоритм последовательно погружается, начиная с конца, в пространство данных БД. Окончательный результат погружения алгоритма в пространство данных и будет ответом на запрос. Ответ на запрос выдается на языке пользователя, например: "Норма времени работы оборудования k при выполнении Операции l для Детали j Изделия i равна 0,25 нормо-часа".

Таблица 2

Понятийное описание изделия

Понятие	Свойство	Характеристики	Значение характеристик
1	2	3	4
Деталь	<i>имеет</i>	общие характеристики	назначение, чертеж, габариты, технология изготовления.
		количественные характеристики	вес, размер, длительность изготовления, трудоемкость, затраты, количество операций.
		качественные характеристики	влагоустойчивость, температурный режим.
	<i>требует</i>	для изготовления	операция, материал (норма расхода).
Технология	<i>имеет</i>	общие характеристики	наименование, шифр, последовательность операций; материал, заготовка, детали, оборудование, профессия.
		количественные характеристики	длительность изготовления, трудоемкость, затраты, кол-во операций, последовательность операций, техмаршрут.
		качественные характеристики	специфические условия применения, преимущества.
	<i>требует</i>	для выполнения	оборудование, нормо-часы; профессия, нормо-часы; материал, норма расхода.
Оборудование	<i>имеет</i>	общие характеристики	назначение, преимущества, условия эксплуатации, операции.
		количественные характеристики	количество в группе, вес единицы, габариты, производительность, норма времени, время на переналадку.
		качественные характеристики	влагоустойчивость, температурный режим, условия эксплуатации.
	<i>принадлежит</i>	группе оборудования	оборудование, группа оборудования, количество.

Задача "Контроль Производственной программы цеха". Суть задачи контроля заключается в предварительной проверке производственной программы цеха на новый период на обеспеченность технической документацией с целью выявления и устранения таких расхождений до начала планового периода [13, 14, 16]. Интеллектуальной системой задача воспринимается как предметная область. Знания о задаче и методах ее решения описываются и представляются с учетом используемых в ней понятий и отношений. Понятиям даются определения и указываются их свойства. При описании взаимоотношений между понятиями устанавливается характер отношений. Результатом является общий список понятий, их определения и термины для описания свойств и отношений. Знания, описывающие задачу, представляются в виде процедурных и декларативных знаний с помощью семантических сетей, фреймов, продукций и логических моделей. При недостатке знаний используется опыт и знания менеджеров реального производства, владеющих полной информацией о решении задачи. В роли базовых понятий выделены организационные единицы, документы и их взаимодействие.

Элементами организационной структуры являются отделы: конструкторско-технологический и производственный и цех. В данной задаче они выступают как неделимое целое, проявляясь только той ролью, которую они играют в общем процессе решения задачи. При онтологическом описании используется только это их свойство. По мере рассмотрения других задач предметной области могут добавляться новые свойства. Для описания функций элементов организационной структуры использовались термины: "разрабатывает, согласовывает, выполняет".

Задача использует документы: Производственную программу, Техническую документацию и Условия цеха. При выявлении необеспеченности и несоответствий информации документов используются знания о видах несоответствий, причинах и действиях по их устранению. На выходе получаем несоответствия и действия по устранению на конкретный период. При описании документов указывается их назначение и работающие с ними службы с видами работ. Описываются понятия, их свойства, характеристики и их значения, характер взаимодействия служб и документов. Конкретизация характера служб представляет уточнение свойств путем указания "с кем и с чем они проявляются". На основании приведенной выше информации разрабатываются онтологические схемы, на которых в графическом виде отражены понятия и их отношения. Более детально это продемонстрировано в следующем подразделе статьи.

Информацию документов можно представить пользователю в

привычной для него форме – как нормативная, плановая и фактическая модели производства (рис. 2).

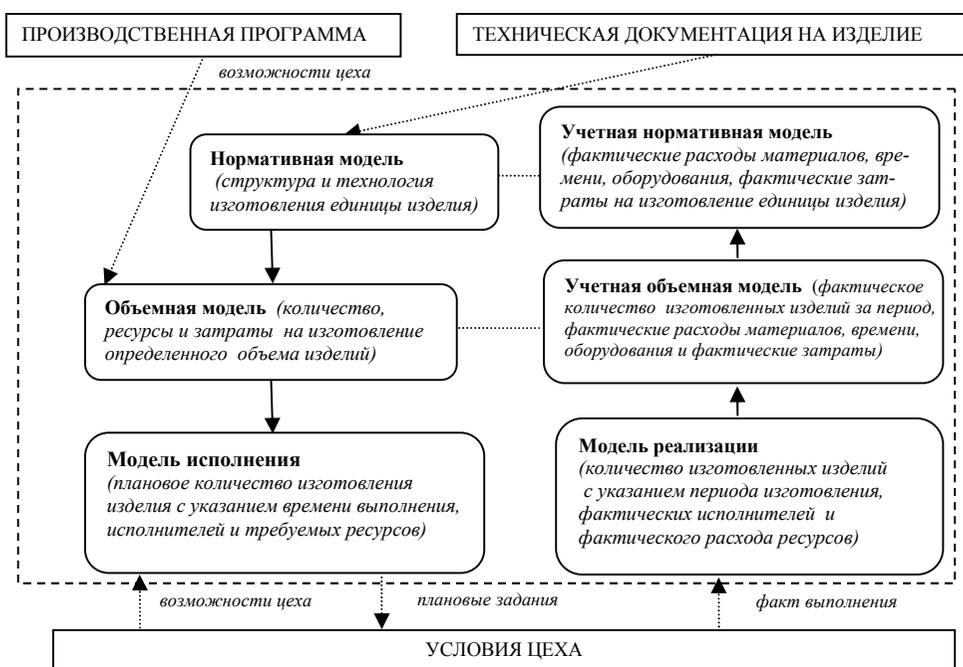


Рис. 2. Информационные модели изделия в системе управления цехом

Каждая модель характеризует изделие, но имеет свое назначение в общем процессе его изготовления. Нормативная модель отображает структуру и технологию изготовления единицы изделия, объемная – объемные показатели изготовления определенного количества изделия, выполнения – плановая привязка элементов объемной модели к конкретным исполнителям и оси времени, реализации – фактическое изготовление изделия конкретными исполнителями в привязке к конкретному моменту времени, учетная объемная – фактические объемные показатели изготовления определенного количества изделия, учетная нормативная – фактические значения элементов нормативной модели в расчете на единицу изделия, узла, детали. Построение моделей связано с решением целой цепочки задач, связанных с определением собственных возможностей предприятия по изготовлению изделий и возможностей изготовления их посторонними организациями, расчетом потребности в ресурсах и поиском поставщиков, определением партий изготовления, времени опережения и циклов изготовления, материальных и финансовых потоков. Такой вид имеют модели

представления изделия на логическом уровне при анализе предметной области.

На этапе проектирования и компьютерной реализации модели будут реализованы в виде взаимосвязанных файлов базы данных и знаний, и соответствующих алгоритмов и программ.

Контроль документов, их структуры и взаимосвязей с другими документами. Разработана модель контроля ввода реквизитов документов, полноты их структуры и взаимосвязей с другими документами. Создан специальный язык описания документов и их элементов, что позволяет персоналу предприятия самому описывать и изменять используемые документы, что упрощает реализацию задач, связанных с контролем ввода. Работа модели демонстрируется на примере документов задачи "Контроль Производственной программы цеха" (табл. 3 – 6).

Таблица 3

Определения документов

№ п.п.	Документ	Определение
1	Техническая документация	Полная нормативная модель производства, понятия которой во многом определяют понятия всей системы управления производством в целом.
2	Производственная программа	Плановая модель производства, определяющая количественную составляющую (объемы производства, сроки изготовления, затраты) деятельности цеха за определенный период.
3	Условия цеха	Информационная модель о фактических мощностях цеха на плановый период.

Таблица 4

Характер отношений

№№ п.п.	Документы	Отношения
1	Техническая документация, Условия цеха	Конструкторско-технологическая информация. Технической документации должна соответствовать фактическим условиям цеха.
2	Техническая документация, Производственная Программа	Техническая документация должна обеспечивать конструкторско-технологической информацией все позиции Производственной программы цеха.
3	Производственная программа, Условия цеха	Плановая информация Производственной программы должна соответствовать фактическим условиям цеха.

Таблица 5

Типы отношений

№ п.п.	Документы	Типы отношений	Конкретизация отношений
1	Техническая документация, Условия цеха	<i>соответствовать</i>	Детали, операции, оборудование, профессия и материал ТД цех может обрабатывать.
2	Техническая документация, Производственная программа	<i>обеспечивать</i>	По всем изделиям и деталям ПрПр Техническая документация должна содержать конструкторско-технологическую информацию, необходимую для изготовления в цехе.
3	Производственная программа, Условия цеха	<i>соответствовать</i>	Изделия и детали Производственной программы цех может обрабатывать.

Таблица 6

Информационные отношения документов

№ п.п.	Документы	Типы отношений	Конкретизация отношений
1	Техническая документация, Условия цеха	<i>содержать</i> (детали, операции, материал, оборудование, профессия)	Детали, операции, оборудование, профессия и материал технической документации должны содержаться в Условиях цеха.
2	Производственная программа, Техническая документация	<i>содержать</i> (изделия, детали)	Изделия и детали Производственной программы должны содержаться в Технической документации.
3	Производственная программа, Условия цеха	<i>содержать</i> (изделия, детали)	Все изделия и детали Производственной программы должны содержаться в Условиях цеха (обрабатываться цехом).

В задаче используется три документа: Техническая документация на изделие (ТД), Производственная программа цеха (ПрПр) и Условия цеха (УЦ) [13, 14, 16]. Вокруг этих объектов группируются знания. Документы являются базовыми для работы цеха. Они используются при планировании, организации и управлении цехом. Производственная программа содержит информацию о запускаемых в цехе деталях на плановый период. Техническая документация определяет технологию изготовления в условиях предприятия. Условия цеха отражают фактическое состояние цеха на плановый период. С точки зрения формальной структуры все они представляют собой наборы документов, описывающих структуру и технологию изделия, узла и

детали, плановые задания и состояние оборудования, возможных операциях с деталями и материал.

С модельной точки зрения они рассматриваются как нормативная и плановая модель производства и информационная модель фактических мощностей цеха (табл. 3). Характер отношений с выделением типов представлен в табл. 4 – 5, а информационных отношений – в табл. 6. Представленные таким образом описания документов записываются с помощью онтологии и формальных моделей.

Интеллектуальные информационные технологии.

Интеллектуализация системы управления и ее задач осуществляется с помощью стандартных моделей представления знаний и онтологических подходов. На этой базе разработаны модели извлечения, структурирования, формализации и представления знаний, которыми владеют эксперты предметных областей [16], или содержатся в различных письменных источниках [17]. Эти же модели используются при создании и развитии предметно-ориентированной базы знаний интеллектуальной системы [18]. Модели нацелены на совместную работу в рамках систем, реализующих конкретные цели для различных ситуаций. Имеют общую методологическую основу, построены по одним и тем же принципам, используют одни и те же подходы и методы. Модели представляют собой связную целостность: результаты работы моделей предыдущих этапов являются входами для моделей последующих этапов. Общим результатом работы всего комплекса являются знания о предметной области и решаемых там задачах, организованные в систему знаний, имеющую как вербальную, так и формализованную форму представления.

Выводы. Для систем управления производством разработаны модели представления изделия, контроля обеспеченности производственной программы цеха технической документацией и контроля документов с использованием знаний и методов инженерии знаний. Модели описывают понятийную структуру цеха и его деятельность, которая является иерархическим понятийным скелетом при разработке интеллектуальных моделей для решения других задач управления производством. Кроме того, разработанные модели определяют еще и методы, и модели представления и компьютерной обработки знаний, с помощью которых специфика задач производства может отражаться наиболее полно. Дальнейшие исследования в этом направлении направлены на поиск адекватных информационных технологий для компьютерной реализации моделей.

Ориентированные на машиностроительное предприятие, подходы к построению моделей могут быть использованы при интеллектуализации задач других предметных областей.

Список литературы: 1. *Тимашова Л.А.* Организация виртуальных предприятий. Монография / *Л.А. Тимашова, С.К. Рамазанов, Л.А. Бондар, В.А. Леценко.* – Луганск: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2004. – 368 с. 2. *Гаврилова Т.А.* Базы знаний интеллектуальных систем / *Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский.* – СПб.: Питер, 2000. – 384 с. 3. *Поспелов Д.А.* Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов / *Д.А. Поспелов.* – М.: Радио и связь, 1989. – 184 с. 4. *Джарратино, Джозеф. Райли, Гари.* Экспертные системы: принципы разработки и программирование, 4-е издание: Пер. с англ. – М: ООО "И.Д. Вильямс", 2007. – 1152 с. 5. *Гриценко В.И.* Технологии принятия решений в условиях систем интеллектуального управления бизнесом / *В.И. Гриценко, Л.А. Тимашова* // Матеріали школи-семінару "Перспективні технології прийняття рішень в умовах систем інтелектуального управління бізнесом", Київ. – 2014. – С. 4-14. 6. *Тимашова Л.А.* Проблемы интеллектуализации решения задач моделирования и управления производственными процессами / *Л.А. Тимашова* // УСИМ, 2016. – № 4. – С. 16-26. 7. *Степашко В.С.* Концептуальные основы интеллектуального моделирования / *Л.А. Степашко* // УСИМ, 2016. – № 4. – С. 3-15. 8. *Валькман Ю.Р.* На пути построения онтологии интеллектуального моделирования / *Ю.Р. Валькман, П.В. Степашко* // Індуктивне моделювання складних систем – Вып. 7. – К.: МННЦ ІТтаС НАНУ, 2015. – С. 101–115. 9. *Мейтус В.Ю.* Введение в теорию интеллектуальных систем. Основные представления / *В.Ю. Мейтус.* – Palmarium academic publishing, Саарбрюкен, 2015. – 189 с. 10. *Леценко В.А.* Проблемы построения интеллектуальных систем управления предприятиями / *В.А. Леценко* // Індуктивне моделювання складних систем: ЗНП. – Київ: МННЦ ІТ та С НАН та МОН України, 2009. – С. 102-113. 11. *Мейтус В.Ю.* Проблемы создания интеллектуальных систем управления производством / *В.Ю. Мейтус* // Матеріали школи-семінару "Перспективні технології прийняття рішень в умовах систем інтелектуального управління бізнесом", Київ. – 2014. – С. 15-30. – Режим доступу: http://www.irtc.org.ua/Inform/190_2014.pdf. 12. *Тимашова Л.А.* Модели проектирования и управления логистикой виртуального предприятия: монография / *Л.А. Тимашова, Л.П. Тур, В.А. Леценко, Л.Б. Вовк.* – К.: МНУЦИТiС, 2009. – 115 с. 13. *Тимашова Л.А.* Інформаційні системи для сучасних бізнес-аналітиків / *Л.А. Тимашова, Л.А. Бондар, В.А. Леценко, Т.В. Ткаченко, А.Г. Кондиріна* // Монографія. – К.: АПСВ, 2005. – 483 с. 14. *Листопад А.П.* Модели и методы инвестиционной политики развития информационного капитала машиностроительного предприятия / *А.П. Листопад* – Автореф. канд. дисс., 2011. – С. 17. 15. *Леценко В.А.* Программные средства моделирования систем, интегрирующих процессы проектирования и производства / *В.А. Леценко, Л.Ю. Таран* // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования и производства. Материалы второй междунаучно-техн. конф. CAD/CAM/*98, Институт технической кибернетики НАН Беларуси, Минск, 1999. – С. – 102-115. 16. *Тимашова Л.А.* Модели извлечения и структурирования знаний / *Л.А. Тимашова, А.И. Морозова, В.А. Леценко, Л.Ю. Таран* // Індуктивне моделювання складних систем: ЗНП. Відп. ред. В.С. Степашко. – К.: МННЦ ІТ та С, 2015. – С. 132-151. 17. *Тимашова Л.А.* Модель извлечения знаний об умном предприятии из научных статей / *Л.А. Тимашова, А.И. Морозова, В.А. Леценко, Л.Ю. Таран* // Матеріали школи-семінару "Теорія та практика досліджень створення розумних підприємств", Київ, 2015. – С. 32-48. 18. *Тимашова Л.А.* Система представления предметно-ориентированных знаний для создания "умного" предприятия на основе интеллектуальных средств обработки и онтологических подходов / *Л.А. Тимашова,*

А.И. Морозова, В.А. Леценко, Л.Ю. Таран // УСиМ, 2016 – № 5. – С. 47-51
19. Леценко В.А. Онтологический подход к построению интеллектуальных решений / В.А. Леценко // Интеллектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжн. наук. конф. Херсон: ХНТУ, 2010. – С. 266-268.
20. Леценко В.А. Технология извлечения знаний, ориентированная на образное представление цехового управления / В.А. Леценко, А.И. Морозова, Л.Ю. Таран // Материалы III межд. конф. "Вычислительный интеллект: результаты, проблемы, перспективы", ConInt–2015. – Черкассы – 2015. – С. 127-129.

References:

1. Timashova, L.A., Ramazanov, S.K., Bondar, L.A. and Leshchenko, V.A. (2004), *Organization of virtual enterprises*, Monograph, Publishing house of the VNU. V. Dahl, Lugansk, 368 p.
2. Gavrilova, T.A. and Khoroshevsky, V.F., (2000), *Knowledge bases of intellectual systems*, Publishing house: Peter, St. Petersburg, 384 p.
3. Pospelov D.A., (1989), *Modeling reasoning. Experience in the analysis of mental acts*, Radio and Communication, Moscow, 184 p.
4. Jarratino, Joseph, Riley, Gary, (2007), *Expert systems: principles of development and programming, 4th edition: Trans. with English*, ООО "I.D. Williams", Moscow, 1152 p.
5. Gritsenko, V.I., Timashova, L.A., (2014), "Technologies of decision making in the conditions of systems of intellectual management of business", *Perspective technology priyonyattya rishen in the minds of the systems of intellectual control of business*, The materials of the school-seminar, Kyiv, pp. 4-14.
6. Timashova, L.A., (2016), "Problems of Intellectualization of the Solution of the Problems of Modeling and Control of Production Processes", *USIM*, №4, pp. 16-26.
7. Stepashko, V.S., (2016), "Conceptual foundations of intellectual modeling", *USIM*, № 4, pp. 3-15.
8. Val'kman, Yu.R., Stepashko, P.V. (2015), "On the path of constructing the ontology of intellectual modeling", *Inductive modeling of folding systems*, No. 7, MNNC IT and S, pp. 101-115.
9. Meitus, V.Yu., (2015), *Introduction to the theory of intelligent systems. Main ideas*, Palmarium academic publishing, Saarbrucken, 196 p.
10. Leshchenko, V.A. (2009), "Problems of building intellectual systems of enterprise management", *Inductive modeling of folding systems: Proc.*, MNNC IT and S, pp. 102-113.
11. Meitus, V.Yu., (2014), "Problems of creating intelligent production management systems", *Advanced decision-making technologies in the articles of intellectual management of business*, The materials of the school-seminar, Київ. pp. 15-30.
12. Timashova, L.A., Tour, L.P., Leshchenko, V.A. and Vovk, L.B., (2009), *Models of designing and management of logistics of the virtual enterprise: the monography*, MNNC IT and S, Kiev, 115 p.
13. Timashova, L.A., Bondar, L.A., Leshchenko, V.A., Tkachenko, T.V. and Kondirina, A.G., (2005), *Information systems for today's business analysts*, Monograph, APDV, Kiev, 483 p.
14. Listopad A.P. (2011), *Models and methods of investment policy for the development of information capital of a machine-building enterprise, Author's abstract. Cand. Diss.*, Kiev, 17 p.
15. Leschenko, V.A. and Taran L.Yu., (1999), "Software for modeling systems integrating the design and production", *Modeling of intellectual processes of design and production*, Materials of the second international scientific and technical conference CAD / CAM / * 98, Institute of Technical Cybernetics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, pp. 102-115.

16. Timashova L.A., Morozova, A.I., Leschenko, V.A. and Taran, L.Yu., (2015), "Models of knowledge extraction and structuring", Ed. V.S. Stepashko, *Inductive modeling of folding systems: Proc.*, MNNC IT and S, Kiev, pp. 132-151.
17. Timashova, L.A., Morozova, A.I., Leschenko, V.A. and Taran, L.Yu., (2015), "Model of knowledge extraction about a smart enterprise from scientific articles", *Teoriya ta praktyka doslenie svarennya rozumnikh pidpriemstv*, The materials of the school-seminar, Kiev, pp. 32-48.
18. Timashova, L.A., Morozova, A.I., Leschenko, V.A. and Taran, L.Yu., (2016), "The system of representation of object-oriented knowledge for the creation of an "intelligent enterprise based on intelligent processing tools and ontological approaches", *USIM*, Vol. 5, pp. 47-51.
19. Leshchenko, V.A., (2010), "Ontological approach to the construction of intellectual solutions", *Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence*, Proceedings of the International Scientific Conference, KhNTU, Kherson, pp. 266-268.
20. Leshchenko, V.A., Morozova, A.I., Taran, L.Yu., (2015), "The technology of knowledge extraction, oriented to a figurative representation of guild management, *Computational intelligence: results, problems, prospects*, ConInt-2015, Materials of III Intl. Conf., Cherkassy, pp. 127-129.

Статью представил д-р техн. наук, проф. КНУ Заславский А.А.

Поступила (received) 01.12.2017

Timashova Liana, Dr. Tech. Sci.,
Head Department of the International Research and Training Center of Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine,
Glushkov ave., 40; Kyiv, 03680,
Тел.: 0445261319, e-mail: dep190@irtc.org.ua;

Leschenko Valentina, Research Assistant of Virtual systems department of the International Research and Training Center of Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine,
Glushkov ave., 40; Kyiv, 03680,
Тел.: 0953162238, e mail: stepova40@gmail.com.

Morozova Anna, Chief engineer-programmist of Virtual systems department of the International Research and Training Center of Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine,
Glushkov ave., 40, Kyiv, 03680,
Тел.: 0445261319, e-mail: dep190@irtc.org.ua;

Taran Larisa, Chief engineer-programmist of Virtual systems department of the International Research and Training Center of Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine,
Glushkov ave., 40, Kyiv, 03680,
Тел.: 0445261319, e-mail: dep190@irtc.org.ua.

УДК 65.011.56

Інтелектуалізація систем управління виробництвом / Тимашова Л.А., Лещенко В.О., Морозова О.І., Таран Л.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 143 – 158.

Представлені результати інтелектуалізації системи управління виробництвом за допомогою працюючих зі знаннями технологій. Наведено онтологічне опис системи управління та завдань, пов'язаних з поданням виробу, контролю забезпеченості виробничої програми технічною документацією та контролю структури документів. Ил.: 2. Табл.: 6. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: виробництво; системи управління; виріб; виробнича програма; структура документів, знання.

УДК 65.011.56

Интеллектуализация систем управления производством / Тимашова Л.А., Лещенко В.А., Морозова А.И., Таран Л.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 50 (1271). – С. 143 – 158.

Представлены результаты интеллектуализации системы управления производством с помощью работающих со знаниями технологий. Приведено онтологическое описание системы управления и задач, связанных с представлением изделия, контроля обеспеченности производственной программы технической документацией и контроля структуры документов. Ил.: 2. Табл.: 6. Библиогр.: 20 назв.

Ключевые слова: производство; системы управления; изделие; производственная программа; структура документов, знания.

UDC 65.011.56

Intellectualization of management systems / Timashova LA, Leshchenko VA, Morozova AI, Taran L.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 50 (1271). – P. 143 – 158.

The results of the intellectualization of the production management system with the help of knowledgeable technologies are presented. An ontological description of the management system and tasks associated with the presentation of the product, control of the provision of the production program with technical documentation and control of the structure of documents is given. Figs.: 2. Tabl.: 6. Refs.: 20 titles.

Keywords: production; management tasks; product; production program; structure of documents, knowledge.

ЗМІСТ

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах 3

Математические методы и модели

Велиев Э.И. О свертке рядов Шлемильха – новые представления 5

Гасанов М.Г., Гардашов С.Г. Определение оптимальных размеров элементов пьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов 25

Подорожняк А.О., Токарев М.Г. Метод генерації псевдовипадкових чисел високої стійкості 36

Роенко Е.С., Садовой А.В. Линеаризация математической модели маятника Фуруты 46

Скарга-Бандурова І.С., Грушка М.О., Барбарук Л.В. Підходи до ефективного спрощення і візуалізації великих наборів даних 55

Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Численное исследование колебания трубопроводов с учетом вязкоупругого основания грунта 66

Эргашев Т.Г. Формула обращения интегрального уравнения Вольтерра с функцией Гумберта в ядре и её приложения к решению краевых задач 75

Samigulina G.A., Massimkanova Zh.A. Computer modeling of new drugs based on the methods of swarm intelligence and immune network modeling 88

Проблемы защиты информации в современных системах

Гриб О.Г., Швец С.В., Бортников А.В. Синтез элементов энергосистемы по критерию надежности в условиях кибербезопасности 97

Новые средства информатики и искусственного интеллекта

Дашкевич А.А. Исследование моделей сверточных автоэнкодеров для выделения признаков в наборах стереоизображений 112

<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Леонов С.Ю.</i> Нейронная сеть Хемминга для решения задач с несколькими решениями	119
<i>Каргин А.А., Петренко Т.Г.</i> Абстрагирование и категоризация в умных машинах на основе гранулярных вычислений	130

Интеллектуальные технологии и системы

<i>Тимашова Л.А., Леценко В.А., Морозова А.И., Таран Л.Ю.</i> Интеллектуализация систем управления производством	143
---	-----

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 50 (1271)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 39 – 17

Підп. до друку 21.12.2017 р. Формат 70x100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2,

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Виготовлено у ТОВ ВПП "Контраст".
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 40, оф. 221.
Св-во: ДК №1778 від 05.05.2004